

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la recherche scientifique



وزارة التعليم العالي
والبحوث العلمي

Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département de Métallurgie

**Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en Métallurgie**



Proposé et dirigé par :
Mr. A. DAIMELLAH

Réalisé par :
Mr. M^{ed} Amine. KHALDI
Mr. M^{ed} Walid. LAGGOUNE

Juin 2013

École Nationale Polytechnique, Hacén Badi, B.P, El-Harrach, 16200 Alger
Tél.: 021.52.53.01-03, Fax: 021.52.29.73, www.enp.edu.dz

ملخص

يندرج هذا العمل في إطار دراسة سلك النحاس المغلف بالزنك الموجه إلى التقطيع بواسطة التآكل الحراري وتهدف هذه الدراسة إلى معرفة بنية السلك ومعرفة مدى تأثير المعالجة الحرارية على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لهذا السلك (البنية، الاجتذاب، الصلابة، المقاومة الكهربائية).

من أجل رؤية البنية استعملنا المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني ومن أجل المعالجة الحرارية استعملنا الفرن المفرغ من الهواء لتجنب تأكسد السلك.

كلمات مفتاحية: التآكل الحراري، سلك النحاس المغلف بالزنك، المعالجة الحرارية، الاجتذاب، المقاومة الكهربائية، الصلابة.

Résumé

Le présent travail entre dans le cadre d'étude d'un fil de cuivre zingué destiné à l'usinage par électroérosion, cette étude a deux objectifs : Le premier est de caractériser la microstructure de ce fil. Le second est de comprendre l'influence du traitement thermique sur sa microstructure et ses propriétés physique et mécanique (la résistivité électrique, la traction et la microdureté).

La caractérisation de la microstructure a été faite par le microscope optique et le MEB, et son traitement thermique était dans un four sous vide, pour éviter l'oxydation de ce fil.

Mots clés: électroérosion, fil en cuivre zingué, traitement thermique, résistivité électrique, traction, microdureté.

Abstract

This present works enters into the framework of the study of a copper wire coated with zinc intended for electrical discharge machining. We characterized the microstructure of the wire. In a second time we studied the influence of the heat treatment on its microstructure and its physical and mechanical properties (electrical resistivity, tensile strength and micro hardness).

The characterization of the microstructure was made by the optical microscope and the MEB .The heat treatment was performed in a vacuum to avoid the oxidation of this wire.

Keywords: electrical discharge machining, copper wire coated with zinc, heat treatment, electrical resistivity, tensile strength, micro hardness.

Remerciements

*Avant tout, merci à **DIEU** tout puissant pour sa bonté et sa clémence de nous avoir permis de mener à bien ce modeste travail ;*

*Nous tenons à remercier, tous particulièrement notre encadreur **Mr. A. DAIMELLAH**, pour son dévouement, ses conseils, son soutien moral, ses encouragements durant les moments difficiles et surtout dans la partie expérimentale, et pour toute l'attention qu'il nous a portée.*

*Nous remercions profondément, **M^{me}. N. KECHOUD** pour nous avoir honorés en acceptant de présider le jury. De même, nous remercions énormément les membres du jury **Mr. F.HELLAL** et **Mr. ZOUATI** Le représentant de **BCR** d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Nous tenons à remercier tous les travailleurs de l'entreprise **BCR** de nous avoir procuré le fil objet de notre étude et l'utilisation de four sous vide.*

*Nous tenons également à remercier **M^{lle}. ILHAM** ingénieur au laboratoire **CATEL**, et tous les travailleurs de cette l'entreprise.*

*Au laboratoire du département Métallurgie, nous n'oublions pas d'exprimer nos vifs remerciements à **M^{lle}. H. HACHEMI** étudiante en post graduation et ingénieur dans ce laboratoire, pour son aide précieuse.*

*Nous tenons à remercier notre ami et notre frère **AMIR** pour son aide dans les moments difficiles.*

Nous n'oublions pas de remercier les enseignants du département de Métallurgie à l'école nationale polytechnique pour nous avoir offert une bonne formation, ainsi qu'à tous nos camarades de la promotion.

Enfin nous tenons à exprimer notre gratitude envers toute personne ayant contribué à la réalisation de ce modeste travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail avec toute mon affection aux êtres, qui me sont très chers au monde mes parents ;

A mes frères et mes sœurs que Dieu les protège;

A ma tante et toute ma famille ;

*A tous mes amis, particulièrement, Yakoub SAADI,
Yasser NEZZARY et Hamza AZZIB ;*

*A tous les étudiants de 5^{ème} année et du département de
métallurgie.*

KHALDI Mohamed El Amine.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

À ma mère et mon père ;

À mon frère et ma sœur ;

À toute ma famille ;

À tous mes amis ;

*À tous ceux que j'aime et qui m'aiment, où qu'ils
soient.*

Walid.

Liste des Figures

Chapitre I. Généralité sur l'usinage par électroérosion.

Figure I.1. Équipement d'usinage par électroérosion.	- 3 -
Figure I.2. Principe de déplacement de la pièce lors l'usinage par électroérosion	- 4 -
Figure I.3. Cycle d'étincelage l'ébauche d'une machine charmillles robofil 2020	- 5 -
Figure I.4. L'ionisation de la matière	- 6 -
Figure I.5. Fusion-vaporisation de la matière.	- 7 -
Figure I.6. Ejection de la matière	- 7 -
Figure I.7. Phénomène de polarisation de l'électrode par rapport à la pièce	- 8 -
Figure I.8. Représentation schématique des différents types d'usinage et leur principe	- 11 -
Figure I.9. Défonçage par électroérosion	- 11 -
Figure I.10. Quelques pièces usinées par enfonçage	- 12 -
Figure I.11. Principe de découpage par électroérosion par une électrode fil	- 12 -
Figure I.12. Quelques pièces usinées le découpage par fil	- 13 -
Figure I.13. Principe d'usinage par surfaçage	- 13 -
Figure I.14. Machine moderne en commande numérique	- 14 -

Chapitre II. Généralités sur le cuivre, ses alliages, et leurs traitements thermiques.

Figure II.1. Exemple d'évolution de la taille des grains recristallisés en fonction de la température de recuit	- 20 -
Figure II. 2. Variation de la grosseur du grain en fonction du taux d'écroutissage pour des recuits à température et temps de maintien fixes.....	- 21 -
Figure II.3. Évolution de la force à la rupture (R_m), ($R_{p0,2}$) et l'allongement (A%) en fonction de la température de recuit	- 21 -
Figure II. 4. Charge de rupture en fonction des allongements pour les états écrouis et recuit ménagé	- 22 -
Figure II.5. Structure cubique centrée de la phase bêta du laiton Cu-Zn.	- 23 -
Figure II.6. Diagramme de phase du système Cuivre-Zinc	- 25 -
Figure II.7. Schéma du dispositif de recuit pour les fils de cuivre	- 29 -
Figure II.8. Coulée continue horizontale en lingotière à filière de graphite.	- 30 -
Figure II.9. Fil en laiton galvanisé	- 31 -

Chapitre III. Dispositifs et technique expérimentaux

Figure III.1. four sous vide AICHELIN.....	- 33 -
Figure III.2. échantillon enrobé.....	- 35 -
Figure III.3. Photo des polisseuses.....	- 36 -
Figure III.4. Microscope optiqueOPTIKA M-789.....	- 37 -
Figure III.5. Microscope électronique à balayage MEB.....	- 39 -
Figure III.6. Le dispositif de mesure de la résistivité électrique.....	- 40 -
Figure III.7. Microduromètre SHIMATZU HMV-M3.....	- 40 -

Figure III.8. Exécution et mesure de la microdureté Vickers.	- 41 -
Figure III.9. Empreintes du microduromètre sur l'échantillon EH + (700°, 30').	- 42 -
Figure III.10. Machine de traction.	- 43 -
Figure III.11. Courbe conventionnelle de traction.	- 44 -

Chapitre IV. Résultats et interprétations

Figure IV.1. Structure verticale d'un fil neuf en cuivre revêtu en zinc, poli mécaniquement non attaqué.	- 46 -
Figure IV.2. Micrographie horizontale du fil neuf après l'attaque à chlorure ferrique.	- 47 -
Figure IV.3. Image binaire montrant le fil à âme de cuivre α et couche de zinc diffusagé en phase β , attaqué au nital, après traitement d'image.	- 48 -
Figure IV.4. Micrographie MEB de la surface du fil neuf.	- 49 -
Figure IV.5. Structure d'un fil usagé en cuivre revêtu en zinc, poli mécaniquement non attaqué.	- 50 -
Figure IV.6. Micrographie de l'interface d'un fil usagé après l'attaque à chlorure ferrique.	- 51 -
Figure IV.7. Micrographie MEB de la surface du fil usagé.	- 52 -
Figure IV.8. Cratères d'érosion sur des fils usagés.	- 53 -
Figure IV.9. Cycle de traitement thermique de recuit d'un fil de cuivre zingué.	- 54 -
Figure IV. 10. Micrographie du fil traité après l'attaque à chlorure ferrique.	- 55 -
Figure IV.11. Variation de la résistivité électrique avec la nature des fils.	- 58 -
Figure IV.12. Variation de la microdureté des fils dans la position horizontale.	- 60 -
Figure IV.13. Variation de la microdureté des fils dans la position verticale.	- 60 -
Figure IV.14. Variation de la microdureté avec la température de traitement.	- 61 -
Figure IV.15. Courbes de traction superposées du fil neuf et le fil usagé.	- 62 -
Figure IV. 16. Courbes de traction superposées du fil neuf et les fils traités 700°, 750°, 800°C -	- 63 -

Liste des tableaux

Chapitre II. Généralité sur le cuivre, ses alliages, et leurs traitements thermiques.

Tableau II.1. les principales caractéristiques physiques de cuivre	- 17 -
Tableau II.2. les principales caractéristiques mécaniques de cuivre.....	- 18 -
Tableau II.3. Les différentes propriétés physiques et mécaniques de zinc	- 23 -
Tableau II.4. la possibilité d'exécution de certain type de laitons simples et ceux de plomb pour des différentes applications.....	- 27 -

Chapitre III. Dispositifs et techniques expérimentales

Tableau III.1. le choix des échantillons, abréviations, et positions.	- 34 -
Tableau III.2. Caractéristiques mécaniques de la traction.	- 45 -

Chapitre IV. Résultats et interprétations

Tableau IV.1. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil neuf.	- 56 -
Tableau IV.2. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil usagé.....	- 57 -
Tableau IV.3. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil après un recuit à 700°C.....	- 57 -
Tableau IV.4. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil après un recuit à 750 °C.....	- 57 -
Tableau IV.5. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil après un recuit à 800 °C.....	- 58 -
Tableau IV.6. Dureté Vickers pour les différents échantillons neuf, usagé et traité.	- 59 -
Le tableau IV.7 résume les résultats de l'essai de traction pour les différents fils avant et après utilisation, et après les traitements thermiques.	- 63 -

SOMMAIRE

Introduction générale	- 1 -
<i>Chapitre I. Généralités sur l'usinage pas électroérosion.</i>	
Introduction	- 3 -
I.1. Principes de l'enlèvement de matière par électroérosion	- 3 -
I.1.1. Principe mécanique	- 4 -
I.1.2. Principe électrique de l'usinage par étincelage érosif à fil	- 4 -
I.2. Phénomènes associés à chaque cycle d'étincelle d'ébauche	- 5 -
I.2.1. L'initiation de la décharge	- 6 -
I.2.2. La fusion et la vaporisation de la matière	- 6 -
I.2.3. L'éjection de la matière	- 7 -
I.3. Le diélectrique	- 8 -
I.4. Matériaux pour fils	- 9 -
I.5. Le type des électrodes.....	- 10 -
I.6. Les différents types d'usinage par électroérosion	- 10 -
I.6.1. Usinage en plongée (Enfonçage)	- 11 -
I.6.2. Usinage par découpage	- 12 -
I.7. Domaine d'utilisation	- 13 -
I.8. Conséquences sur la pièce usinée par électroérosion	- 14 -
I.9. Caractéristiques industrielles de l'usinage.....	- 15 -
<i>Chapitre II. Généralités sur le cuivre, ses alliages, et leurs traitements thermiques.</i>	
Introduction	- 16 -
II.1. Les cuivres industriels	- 16 -
II.2. Propriétés physiques.....	- 17 -
II.3. Propriétés mécaniques.....	- 18 -
II.4. Traitement thermique de cuivre et ses alliages	- 18 -
II.4.1. Traitement de recuit.....	Erreur ! Signet non défini.
II.4.1.1. Recuit de recristallisation.....	- 19 -
II.4.1.1. Recuit ménagé.....	- 22 -
II.5. Le zinc	- 22 -

II.6. Les alliages à base cuivre-zinc (les laitons)	- 23 -
II.6.1. Diagramme d'équilibre	- 24 -
II.6.2. Les laitons simples ou (monophasé α).....	- 26 -
II.6.3. Les laitons complexes (spéciaux)	- 26 -
II.7. Les performances de fil du cuivre revêtu en zinc.....	- 27 -
II.8. Tréfilage des fils.....	- 28 -
II.8.1. Machines à tréfiler	- 29 -
II.9. Galvanisation des fils	- 30 -

Chapitre III. Dispositifs et techniques expérimentales.

III.1. Matériau étudié	- 32 -
III.2. Traitement thermique	- 32 -
III.3. Préparation métallographique	- 33 -
III.3.1. Prélèvement des échantillons	- 33 -
III.3.2. Enrobage	- 34 -
III.3.3. Polissage mécanique	- 35 -
III.3.4. Attaque chimique	- 36 -
III.4. Méthodes d'examens métallographiques	- 37 -
III.4.1. Microscopie optique	- 37 -
III.4.2. Traitement d'images numériques	- 37 -
III.4.3. Microscopie électronique à balayage	- 38 -
III.5. Caractérisation électrique par mesure de la résistivité électrique	- 39 -
III.6. Caractérisations mécaniques	- 40 -
III.6.1. Microdureté	- 40 -
III.6.2. Essais de traction	- 42 -
III.6.2.1. La machine d'essai utilisée	- 42 -
III.6.2.2. Courbe de traction conventionnelle	- 43 -

Chapitre IV. Résultats et interprétations.

IV. 1 Résultats et interprétations de l'examen métallographique des fils de cuivre revêtus en zinc « neuf, traité et usagé ».....	- 46 -
IV.1.1 Résultats métallographiques du fil neuf.....	- 46 -
IV.1.1.1. Observation par microscopie optique	- 46 -
IV.1.1.2. Résultats métallographiques de microscopie électronique à Balayage	- 49 -
IV.1.2. Résultats métallographiques du fil usagé.....	- 50 -

IV.1.2.1. Résultats métallographiques de microscopie optique.....	- 50 -
IV.1.2.2. Résultats métallographiques de microscopie électronique à Balayage	- 52 -
IV.1.4. Evolution de la structure du fil neuf après traitement thermique.....	- 53 -
IV.1.4.1. La micrographie du fil après traitement thermique	- 54 -
IV. 2 Résultats et interprétations de l'influence du traitement Thermique sur la résistivité électrique.....	- 55 -
IV. 2.2. Détermination de ρ_{moy} du fil neuf et du fil usagé	- 57 -
IV. 2.2. Détermination de ρ_{moy} du fil neuf après les traitements thermiques	- 57 -
IV.3. Résultats et interprétations de l'essai de microdureté.....	- 59 -
IV.4. Résultats et interprétations de l'essai de traction.....	- 62 -
Conclusion générale.....	- 65 -

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'usinage par électroérosion est une technique procédant par fusion, vaporisation et éjection de la matière. L'énergie est apportée par des décharges électriques passant entre deux électrodes, la pièce et l'outil. L'électroérosion est incontournable pour réaliser des formes complexes dans des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques.

L'électroérosion est utilisée dans divers secteurs de l'industrie, pour usiner des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs : aciers trempés, alliages métalliques réfractaires, certains composites, etc. Le plus gros utilisateur est le secteur de l'outillage : moules de verrerie, d'injection de matière plastique, matrices, poinçons, filières. Le procédé est aussi utilisé en aéronautique, pour des perçages ou usinages sur aubes ou disques de turbine. Les autres utilisateurs sont le domaine nucléaire, le domaine médical (prothèses, aiguilles), la mécanique générale et l'automobile pour des applications particulières (perçage d'injecteurs Diesel).

En 1977, le savant anglais PRIESTLEY avait constaté l'effet érosif des décharges électriques. En faisant des recherches pour éliminer cet effet érosif, les savants Russes B.R et N.I. LAZARENKO eurent l'idée d'exploiter l'effet destructeur des décharges pour développer un procédé contrôlé d'usinage des métaux [1].

En 1943, ils mirent au point un liquide diélectrique, provoquant l'érosion de ces derniers. On nomme un tel procédé l'usinage par étincelage érosif, ou électroérosion en français et «electrical discharge machining» en anglais. La société suisse AGIE, bientôt suivie par CHARMILLES, développa une machine d'usinage par électrode massive en 1954 : c'est la technique d'électroérosion par enfonçage ou «die sinking electrical discharge machining». En 1969, AGIE développa une machine d'usinage par fil : c'est la technique d'électroérosion par fil ou «wire electrical discharge machining», à laquelle est consacré le présent travail. Les fils utilisés étaient en cuivre ou en laiton [2].

En 1979, la société CHARMILLES déposa un brevet permettant d'augmenter la vitesse d'usinage du procédé en utilisant un fil revêtu de zinc. Puis en 1980, elle déposa un brevet portant sur un fil revêtu en zinc, et traité thermiquement [3].

La plupart des machines à électroérosion par fil utilisent des fils de cuivre ou de laiton standard. les différents fils n'offrent pas le même degré de qualité et de pureté. S'il est vrai que certains fils coûtent moins chers, il n'en demeure pas moins que leur utilisation entraîne une vitesse

de coupe plus lente, de fréquentes ruptures de fil et des besoins accrus de maintenance compte tenu des impuretés qui bloquent les guides et autres composantes. Il faut donc se méfier de ces économies pouvant réduire la marge bénéficiaire et s'avérer fort coûteuses en bout de ligne pour l'entreprise.

L'objectif principal de ce travail de projet de fin d'études est de caractériser la microstructure d'un fil en cuivre zingué de diamètre ($\Phi=0,25$ mm) par microscopie électronique à balayage ainsi que les différentes transformations qu'il a subi lors des traitements thermiques. Sur le fil usagé, on a observé les effets de l'électroérosion (les caractères, la variation de ses propriétés électriques et mécaniques), afin de conclure sur ses principaux caractères structuraux.

Le présent mémoire est organisé selon le plan suivant :

Nous présenterons dans un premier chapitre les principes d'usinage par électroérosion et les fils électrodes existants, largement commercialisés notamment les fils en laiton.

Le deuxième chapitre est consacré au cuivre et ses alliages d'une façon générale, et précisément aux fils en cuivre et les principaux traitements thermiques des alliages cuivreux.

Le troisième chapitre est consacré aux principaux dispositifs et techniques expérimentaux utilisés pour la micrographie et le traitement thermique.

Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus de la micrographie et le traitement thermique, ainsi que leur interprétation. Le mémoire se termine par une conclusion et perspectives.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS SUR
L'USINAGE PAR
ÉLECTROÉROSION

Introduction

L'électroérosion, appelée aussi EDM (Electrical Discharge Machining), est un procédé d'usinage qui consiste à enlever de la matière dans une pièce en utilisant des décharges électriques. Cette technique se caractérise par son aptitude à usiner tous les matériaux conducteurs de l'électricité (métaux, alliages, etc.) quelle que soit leur dureté. Pour usiner par électroérosion, quatre éléments sont nécessaires (**Figure I.1**):

- Une électrode
- Une pièce
- Un diélectrique (liquide isolant électrique)
- De l'électricité

L'électroérosion est particulièrement adaptée à la réalisation des empreintes des moules pour l'injection. Elle est aussi utilisée pour obtenir un état de surface granité (dû à l'étincelage). De l'eau ou une huile diélectrique spéciale est utilisée dans le bac où la pièce usinée est immergée. Elle est continuellement filtrée. Dans le cas de l'eau, elle est aussi dé-ionisée par une résine [4].

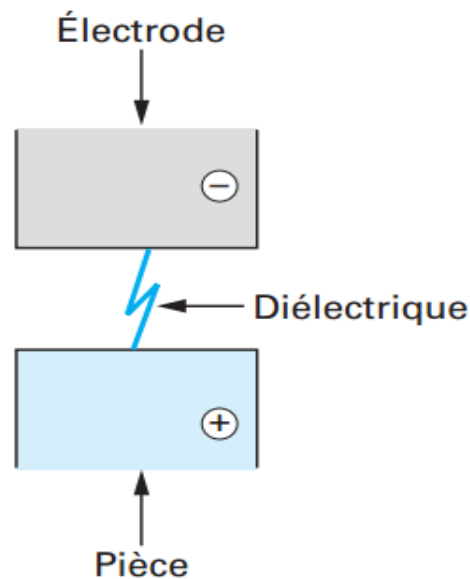


Figure I.1. Équipement d'usinage par électroérosion [4].

I.1. Principes de l'enlèvement de matière par électroérosion

Le procédé d'usinage consiste à faire passer un courant dans un diélectrique, qui a pour but de recréer le phénomène de la foudre qui frappe le sol. Il est recommandé dans les usinages de matériaux très durs (mais impérativement conducteurs), des aciers trempés, ou alors dans les cas où

la complexité de la pièce en nécessite l'usage. L'action du courant, de forte intensité, va ioniser un canal à travers le diélectrique. Un arc électrique va alors se produire, de l'électrode vers la pièce à usiner, détériorant celle-ci très localement (quelque μm^2). Le diélectrique refroidit alors les particules détériorées, qui tombent alors dans le bac de la machine sous forme d'une boue (micro particules de matière et diélectrique). Les vitesses d'usinage ne sont pas très élevées (entre 0,2 et 10 mm/min), mais la précision en est tout à fait l'opposé. Sur une machine bien entretenue, on peut aisément atteindre plus ou moins 5 micromètres sur la cote désirée [5].

I.1.1. Principe mécanique

Une électrode outil en forme de fil est présentée face à une pièce (**Figure I.2**). Une succession d'étincelles est réalisée par un générateur, ce qui érode le fil et la pièce. Le fil, guidé et tendu, est renouvelé en permanence, tandis que la pièce est creusagée d'un sillon. La distance d'étincelage est appelée « gap ». On injecte dans le gap du diélectrique sous pression pour évacuer les résidus d'usinage et pour refroidir le fil. La pièce est déplacée par rapport au fil pour réaliser une saignée selon le contour préprogrammé. Après l'évacuation de la chute, un ou plusieurs contours de finition ou de surfacage sont réalisés [6].

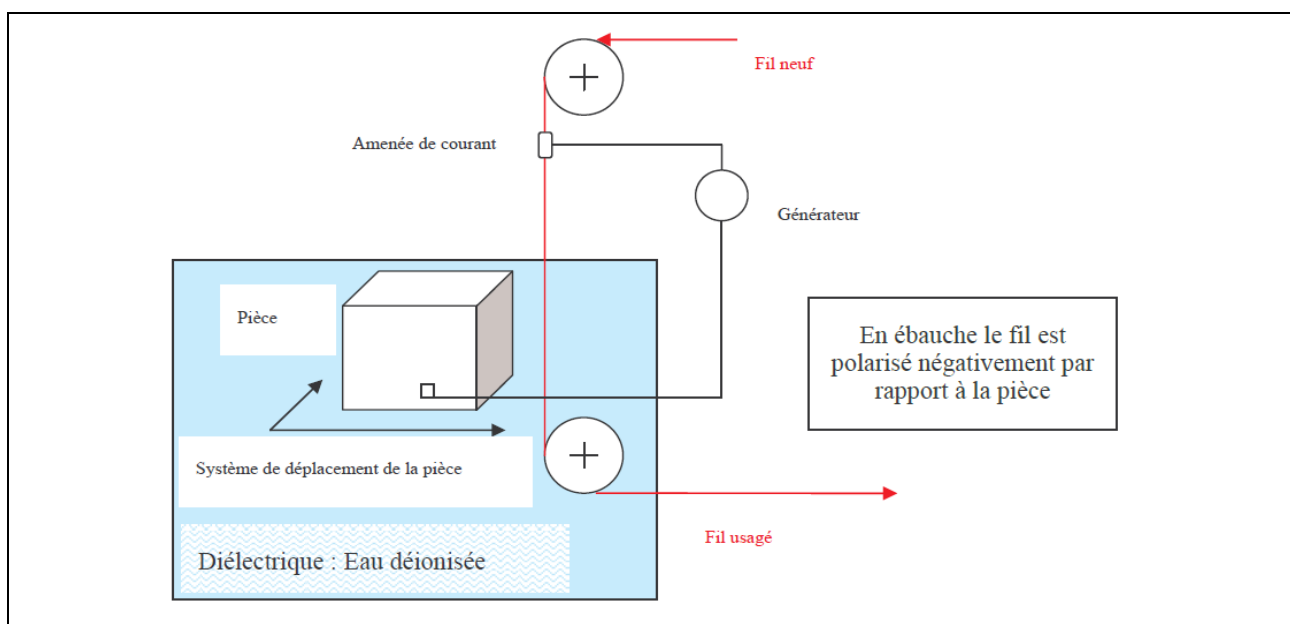


Figure I.2. Principe de déplacement de la pièce lors l'usinage par électroérosion [6].

I.1.2. Principe électrique de l'usinage par étincelage érosif à fil

Il s'agit de créer des arcs électriques entre deux électrodes, l'une étant l'outil, l'autre étant la pièce à usiner, toutes deux plongées dans un liquide diélectrique (**Figure I.3**). Il y a deux grandes

différences dans le fonctionnement électrique séparant les procédés enfonçage et le fil : l'une est la polarité de l'outil par rapport à la pièce, et l'autre est la durée des impulsions de l'ordre de $1 \mu\text{s}$ pour le fil ; qui usine avec des puissances moindres. L'usinage est modulé en puissance par l'intensité et la fréquence des décharges. En ébauche, la fréquence d'étincelage est de l'ordre de 70 kHz. Le courant électrique moyen est de l'ordre de 15 A pour un fil de 0,25 mm de diamètre, alors que l'intensité de crête atteint 200 A. le facteur de forme reliant l'intensité moyenne à l'intensité efficace est de l'ordre de 3 à 4.

La distance entre l'électrode et la pièce est maîtrisée par un système de régulation de l'avance du fil par rapport à la pièce, basé sur le temps moyen pendant lequel le générateur attend le claquage du diélectrique [7].

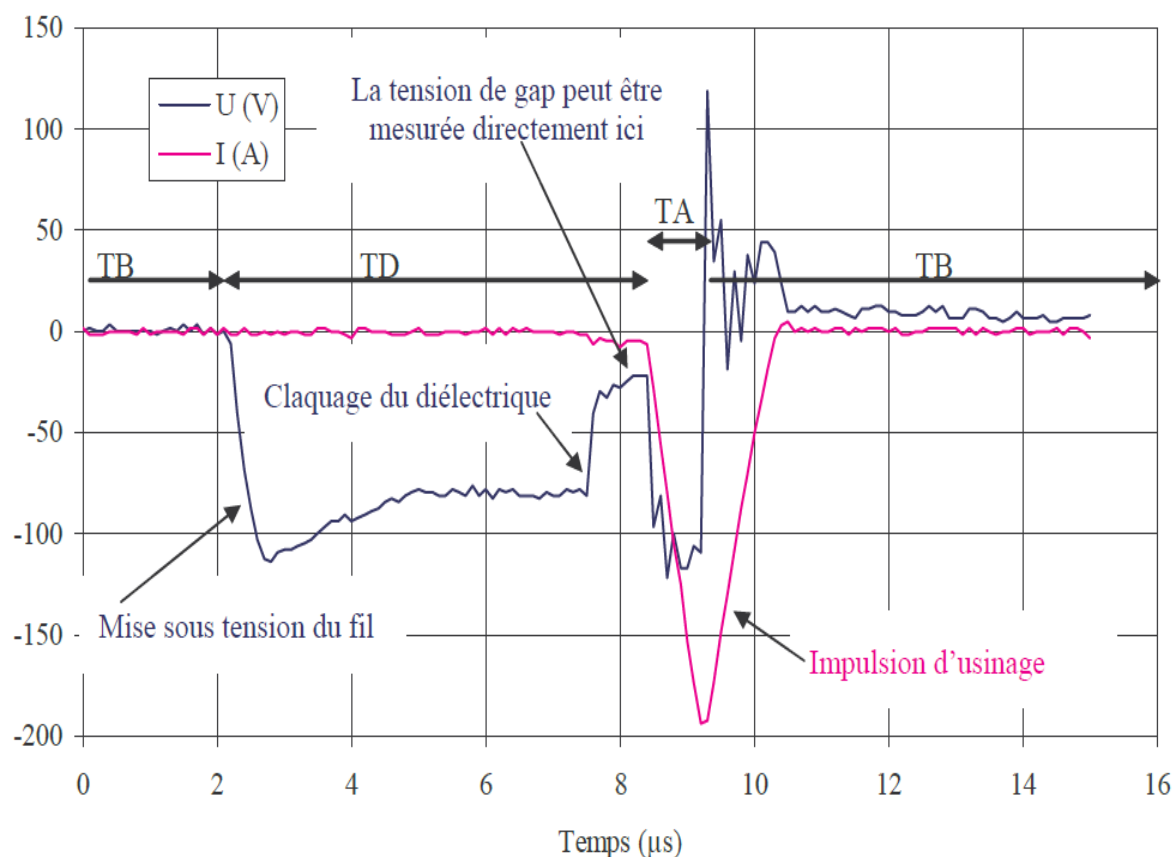


Figure I.3. Cycle d'étincelage l'ébauche d'une machine charmillés robofil 2020 [7].

I.2 Phénomènes associés à chaque cycle d'étincelle d'ébauche

Pour réussir l'étincelage d'une ébauche, il faut entre autres un bon contact électrique entre l'amenée de courant et le fil par un générateur de courant pour assurer la fonction de polarisation.

I.2.1. L'initiation de la décharge

Appelée phase d'ionisation, sous l'action du champ électrique, il se forme, par ionisation du diélectrique, un canal conducteur entre les deux électrodes. L'ionisation a lieu là où le champ électrique atteint une intensité maximale. Cette phase ne dure qu'un temps très bref (10 à 100 ns) par rapport à la décharge (**Figure I.4**). Le canal conducteur est formé d'un plasma, gaz qui subit une ionisation à très haute température (3 000 à 12 000 K). Ce plasma est constitué par des atomes métalliques évaporés aux électrodes [8].

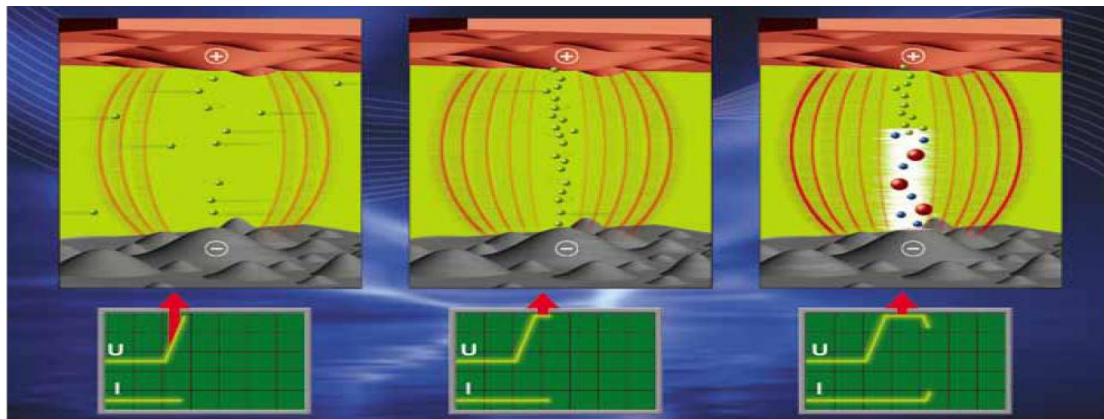


Figure I.4. L'ionisation de la matière [5].

I.2.2. La fusion et la vaporisation de la matière

Pendant cette phase active, l'intensité du courant croît et la tension diminue. Pendant quelques microsecondes à quelques millisecondes, les particules attirées par les deux électrodes vont y libérer leur énergie cinétique et y provoquer un échauffement très important. Les particules positives et négatives se dirigent respectivement vers la cathode et l'anode. La décharge est fortement concentrée dans un canal de petite section, et il en résulte des densités de courant très élevées, de l'ordre de 10^6 A/cm² (**Figure I.5**) [8].

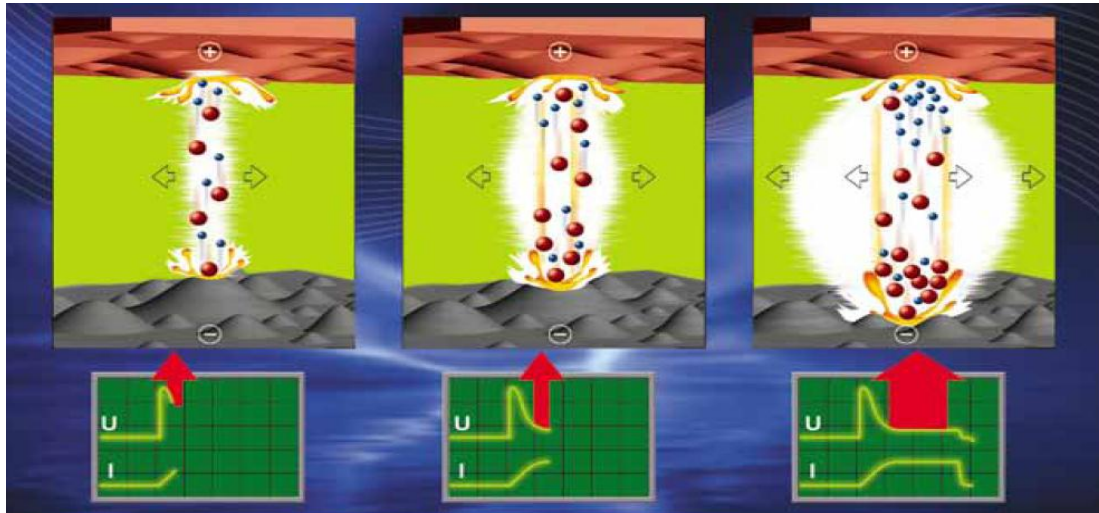


Figure I.5. Fusion-vaporisation de la matière. [4]

I.2.3. L'éjection de la matière

Le circuit électrique est coupé, la bulle de vapeur se trouve entourée de liquide et de solides froids. À ce moment, la température dans la bulle de plasma est de 3000 à 20000K. Des échanges thermodynamiques violents ont lieu. La fin de la décharge est traduite par un effet hydrodynamique: la cavité croît jusqu'à ce que sa pression interne soit minimale, puis sous l'effet de la pression hydrostatique du diélectrique, son volume diminue (**Figure I.6**). Elle se scinde alors en deux parties. Le front de fusion des matériaux des électrodes régresse. Les deux bulles implosent. Une partie du métal encore à l'état liquide est éjectée sous l'impact du liquide diélectrique qui a acquis une grande énergie cinétique durant l'implosion de la cavité. Le métal fondu éjecté se retrouve au sein du diélectrique sous la forme de petites sphérules et laisse un cratère sur chaque électrode. La partie de métal fondu non arrachée solidifie sur place [8].

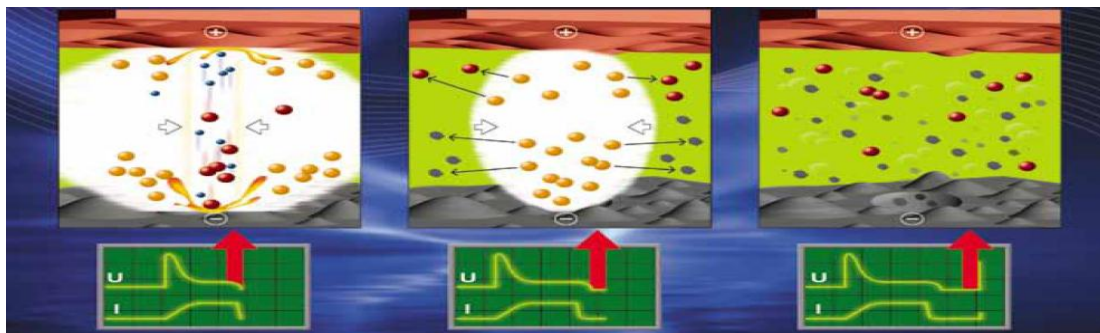


Figure I.6. Ejection de la matière [4].

I.2.4. Polarisation du fil pour l'allumage de l'étincelle

Lors de cette phase, on veut polariser le fil négativement par rapport à la pièce (**Figure I.7**), qui est en général reliée à la masse au but de limiter le risque de rupture du fil, pour réussir cette phase, il faut entre autres un bon contact électrique entre l'amenée de courant et le fil par un générateur de courant pour assurer la fonction de polarisation.

Il faut aussi ne pas être en court-circuit entre le fil et la pièce. Si on ne peut atteindre ou maintenir la tension d'allumage à sa valeur prédéfinie, cela est peut-être dû à un court-circuit local. Dans ce cas, il faut programmer une impulsion de courant de faible intensité. En effet, le phénomène risque de se reproduire plusieurs fois de suite sensiblement au même endroit, et le fil risque de rompre en s'échauffant localement. Un court-circuit par contact entre les électrodes peut se transformer en arc par fusion du pont de matière les reliant, augmentant ainsi l'énergie dégagée localement [8].

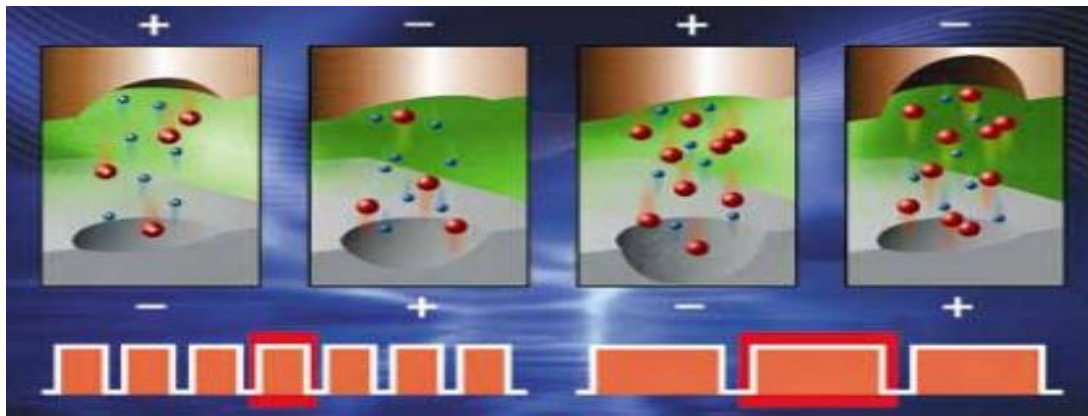


Figure I.7. Phénomène de polarisation de l'électrode par rapport à la pièce [4].

I.3. Le diélectrique

Le diélectrique utilisé est l'eau. Il est en effet nécessaire d'utiliser un fluide à très faible viscosité pour évacuer correctement les particules et remplir l'espace inter électrode, qui est très étroit. L'eau est le fluide le mieux indiqué, pour sa faible viscosité et son bas prix. Pour lui fournir son caractère diélectrique, on utilise des résines piègeuses d'ions pour la désioniser.

L'arrosage peut être réalisé sous pression, jusqu'à 2 MPa, par exemple, pour forcer l'évacuation des débris, particulièrement dans le cas de découpes complexes de forte épaisseur. Certaines installations permettent la découpe de pièces entièrement immergées, ce qui assure un

bon renouvellement du fluide diélectrique et donne un meilleur maintien de la température de la pièce [9].

I.4. Matériaux pour fils

Deux événements peuvent interrompre les décharges ou les perturber : la rupture du fil, qui arrête le phénomène ; un mauvais lavage de l'espace entre pièce et fil, qui peut conduire à la création d'un courant continu. Pour éviter la rupture du fil, il faut utiliser un matériau à haute résistance à la traction. Cette qualité permet aussi une meilleure rigidité du fil entre les guide-fils.

Pour fournir l'énergie nécessaire, il faut considérer la conductivité électrique du matériau. Le cuivre est un matériau à haute conductivité, souvent pris comme référence. L'argent est légèrement plus conducteur, les autres matériaux sont nettement moins bons. Le premier matériau utilisé fut le cuivre. Il fut très vite remplacé par d'autres, qui avaient une moins bonne conductivité, mais donnaient de meilleurs résultats, par exemple le laiton, qui a une bonne résistance mécanique et un meilleur pouvoir de fusion et vaporisation, qualités qui prévalent sur la conductivité électrique.

Il y a en effet deux autres caractéristiques extrêmement importantes et qui permettent un bon lavage de la zone pièce-fil : la température de fusion, la pression de vapeur.

Une température de fusion basse est intéressante car elle favorise l'usure du fil, qui augmente la section utile pour évacuer les débris.

La pression de vapeur est très importante : on préfère que le fil soit vaporisé plutôt que fondu, car, dans ce cas, il se produit des gouttelettes des gaz sont plus faciles à évacuer que des sphérules solides [4].

Par conséquent, les matériaux pour les fils ont des caractéristiques utiles :

- ✓ haute résistance à la traction (limite élastique, charge de rupture) ;
- ✓ haute conductivité électrique ;
- ✓ basse température de fusion ;
- ✓ basse température requise pour maintenir une pression de vaporisation donnée.

I.5. Le type des électrodes

Les matériaux pour fils sont devenus disponibles grâce aux nouveaux types des matériaux. Chaque type a ses propres caractéristiques distinctes, et les développements récents donnent à l'utilisateur une variété de choix.

- **Cuivre**

Le cuivre était le matériau d'origine d'abord utilisé en électroérosion à fil. Il a une conductivité électrique excellente, une faible résistance à la traction, un point de fusion relativement élevé par rapport alliages de cuivre et une faible pression de vaporisation. Aujourd'hui l'utilisation des machines avec des alimentations conçues pour fil de cuivre est limitée.

- **Laiton**

Le laiton était le premier matériau qui remplaça le cuivre au début de la recherche des meilleures performances de l'électrode outil (fil). Le fil de laiton pour EDM est généralement un alliage de cuivre (de 63-65% de Cu) et de zinc (35-37% de Zn). L'addition de zinc au cuivre permet d'augmenter significativement la résistance à la traction, la pression de vaporisation et diminuer le point de fusion.

Le laiton est rapidement devenu le matériau d'électrode le plus largement utilisé pour les fils fins de l'EDM.

- **Laiton enrobé**

Lorsque les fils de laiton ne peuvent pas être tréfilés efficacement avec n'importe quelle teneur en zinc, ceci conduit à un autre fil revêtu, parfois appelés "fil stratifié". Il est généralement constitué par un noyau en laiton ou en cuivre, pour assurer une bonne conductivité électrique et une haute résistance à la traction et un revêtement en zinc pur est déposé généralement par électrolyse ou par projection thermique pour améliorer la formation d'étincelles [4].

I.6. Les différents types d'usinage par électroérosion

Il existe beaucoup de types de machines et d'applications qui utilisent le principe de l'électroérosion. Ci-dessous, nous passons en revue les procédés EDM les plus connus comme le montre la **Figure I.8**.

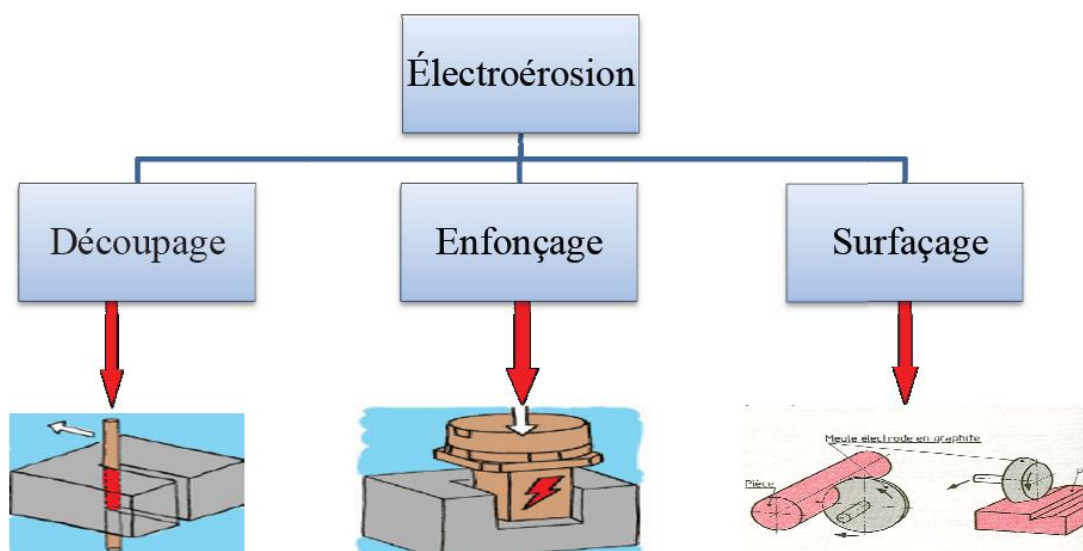


Figure I.8. Représentation schématique des différents types d'usinage et leur principe [10].

I.6.1. Usinage en plongée (Enfonçage)

L'électroérosion par enfonçage reproduit dans une pièce métallique la forme d'un outil appelé électrode comme le montre la **Figure I.9** et la **Figure I.10**.

Dans la zone d'usinage, chaque décharge crée un cratère dans la pièce (enlèvement de matière) et un impact sur l'outil (usure de l'électrode). Il n'y a jamais de contact mécanique entre l'électrode et la pièce. L'électrode est le plus souvent en cuivre ou en graphite [11].

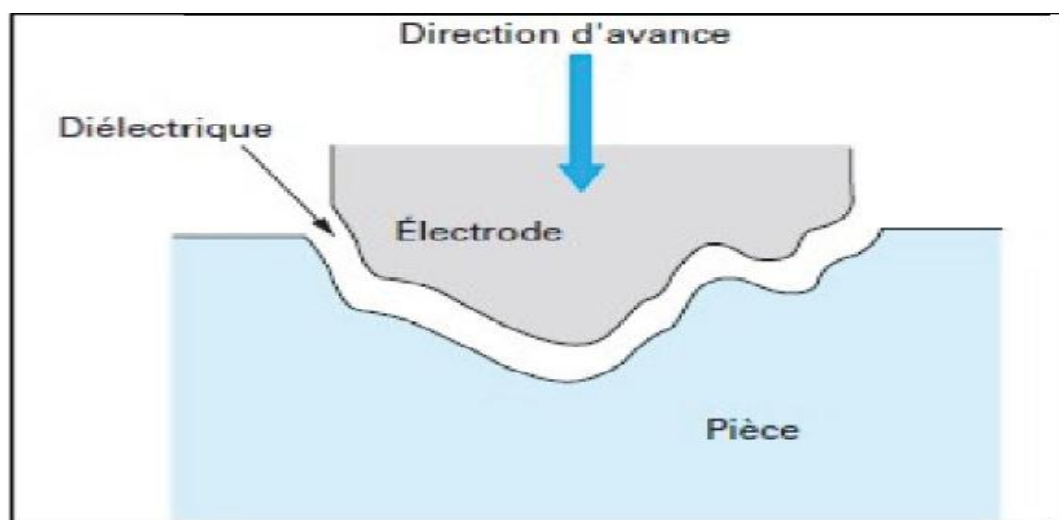


Figure I.9. Défonçage par électroérosion [4].



Figure I.10. Quelques pièces usinées par enfonçage [10].

I.6.2. Usinage par découpage

La découpe par fil consiste à utiliser un fil tendu et à le déplacer à l'aide de mouvements gérés par une commande numérique 2 axes ou 4 axes (la **Figure I.11** et la **Figure I.12**), la matière est enlevée progressivement, et le fil reproduit petit à petit la forme programmée, avec une saignée un peu plus grande que son diamètre (diamètre deux fois la distance inter électrode). Cette technique ne nécessite pas la fabrication préalable d'une ou plusieurs électrodes, et est donc naturellement flexible. Son intérêt principal est de permettre de réaliser des coupes fines, grâce au petit diamètre du fil (0,02 à 0,3 mm ; le plus souvent 0,2 ou 0,25 mm) [4].

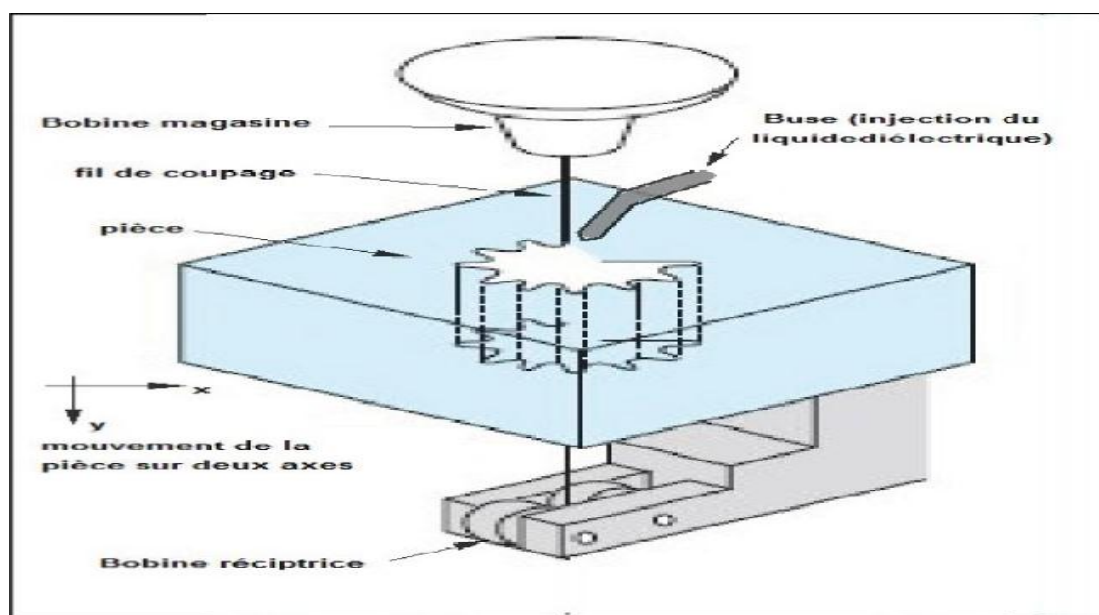


Figure I.11. Principe de découpage par électroérosion par une électrode fil [4].

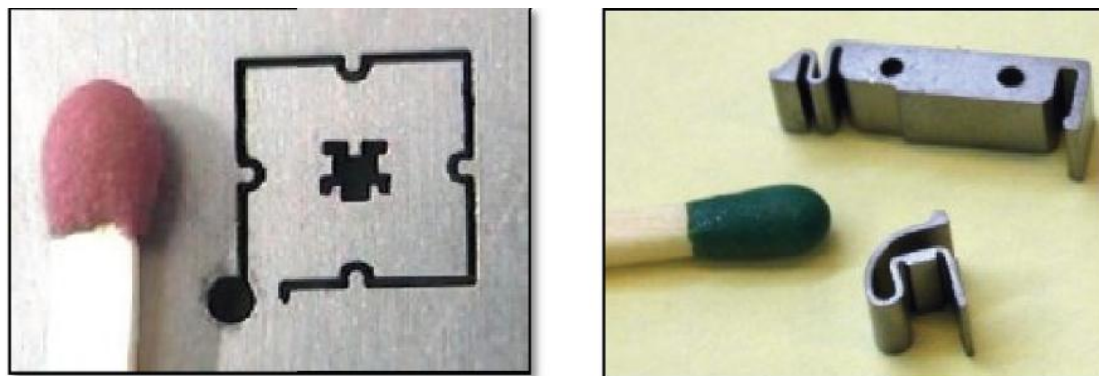


Figure I.12. Quelques pièces usinées le découpage par fil [10].

I.6.3. Usinage par surfacage

Ce procédé s'apparente à la rectification des surfaces planes et cylindriques mais on utilise une meule électrode en graphite comme le montre la **Figure I.13**.

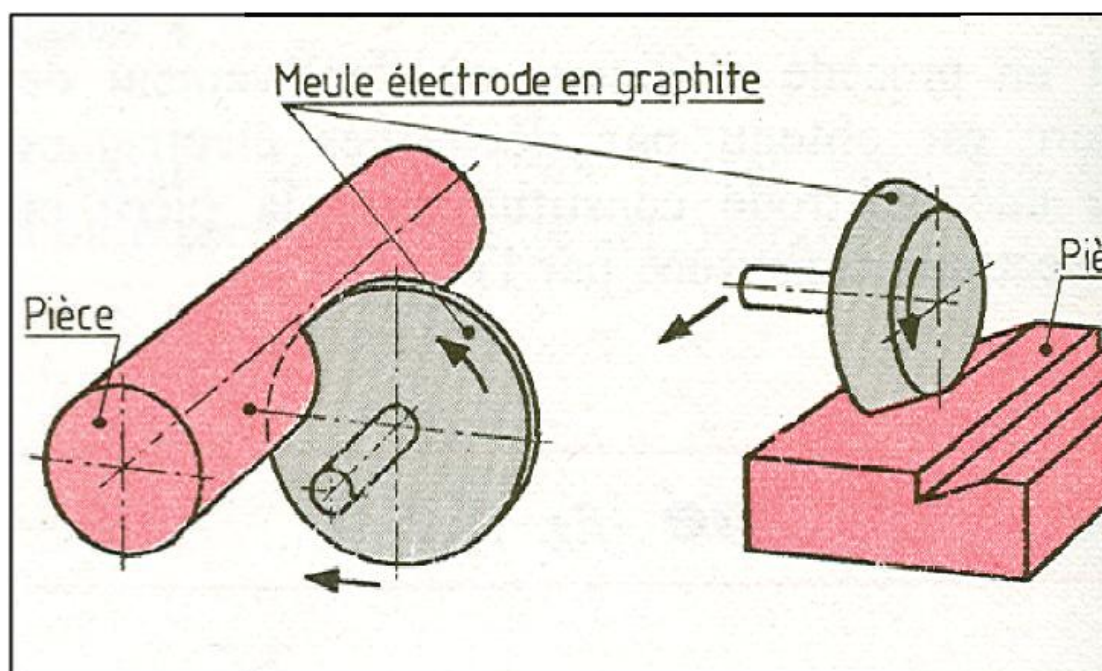


Figure I.13. Principe d'usinage par surfacage [4].

I.7. Domaine d'utilisation

L'électroérosion est utilisée dans divers secteurs de l'industrie, pour usiner des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs : aciers trempés, alliages métalliques réfractaires, certains composites, etc. Le plus gros utilisateur est le secteur de l'outillage : moules de verrerie, d'injection

de matière plastique, matrices, poinçons, filières. Le procédé est aussi utilisé en aéronautique, pour des perçages ou usinages sur aubes ou disques de turbine. Les autres utilisateurs sont :

Le domaine nucléaire, le domaine médical (prothèses, aiguilles), la mécanique générale et l'automobile pour des applications particulières (perçage d'injecteurs diesel, découpe de petites séries) [4]. La **Figure I.14** montre une machine moderne destinée à l'électroérosion par enfonçage



Figure I.15. Machine moderne en commande numérique [10].

I.8. Conséquences sur la pièce usinée par électroérosion

La pièce est découpée. La surface obtenue par érosion est rugueuse. Elle a de plus subi un cycle thermique très fort, qui engendre des contraintes de tension et qui crée des fissures. Du matériau du fil (en général du laiton) se dépose sur la pièce. Plongée dans l'eau déionisée, celle-ci se corrode rapidement, malgré les dispositifs prévus par les constructeurs ; dans de telles conditions, la pièce aurait une durée de vie limitée en fatigue, comparée à une pièce usinée conventionnellement. Une ou plusieurs finitions seront nécessaires pour améliorer la surface de la pièce, et la rendre exploitable en usage industriel, même après plusieurs finitions, on mesure encore des contraintes résiduelles superficielles de l'ordre de 100 MPa dans de l'acier inoxydable dur [12].

I.9. Caractéristiques industrielles de l'usinage

Comparée aux techniques d'usinage conventionnelles (par enlèvement de copeaux) l'électroérosion est lente. L'enlèvement de matière par unité de temps y est 1000 à 10000 fois plus faible, ce qui a des conséquences :

La lenteur du processus d'électroérosion est telle qu'en général, il est utilisé pour la réalisation d'outils, et non pour la production de pièces de série. Les types de pièces les plus courants sont les poinçons et matrices de découpe des métaux, les filières d'extrusion de thermoplastique ou d'aluminium, et les moules d'injection de matières plastiques. La valeur marchande de ces outils rend les usiniers exigeants sur la précision des pièces usinées. La notion de précision englobe la géométrie de la pièce, sa rugosité, et son intégrité de surface, qui conditionnent sa durée de vie en service. Il existe des exceptions à cette règle : on produit en série des injecteurs de carburant pour moteurs à explosion, ou d'autres éléments mécaniques de précision.

La lenteur de l'électroérosion est en partie compensée par l'automatisation des machines, qui peuvent fonctionner jour et nuit, pratiquement sans surveillance. Le temps d'étincelage d'une machine peut atteindre 4500 heures par an. L'automatisation rend les usiniers exigeants sur la fiabilité de leurs machines et en particulier le fil qu'est l'outil de coupe.

Les fabricants de machines et de fils cherchent à accélérer le processus d'érosion. Les améliorations viennent des générateurs d'étincelles, de la circulation du diélectrique, et aussi du fil. Le prix du fil est un facteur à mettre en regard de ses performances [13].

CHAPITRE II

Généralités sur les alliages de cuivre et leurs traitements thermiques

Introduction

Le cuivre est le vingt-neuvième élément du tableau périodique des éléments. C'est un métal de teinte rouge dont la caractéristique principale est sa qualité de bon conducteur de l'électricité associée à une ductilité élevée. La conductibilité électrique du cuivre a été prise comme référence par la Commission Électrotechnique Internationale en 1913, sa résistivité est d'une valeur de 1,724 microhm.cm à l'état recuit. La solidité du fil de cuivre et la fiabilité des contacts électriques qu'il permet d'obtenir les raisons essentielles de l'emploi généralisé du cuivre dans toute l'industrie de la construction électrique, la distribution de l'énergie électrique, ainsi que dans la fabrication de matériels électriques et de composants électroniques [14].

II.1. Les cuivres industriels

Les cuivres industriels peuvent, en général, être classés en trois grandes catégories qui sont, d'après la nomenclature française, Cu-a, Cu-b et Cu-c :

- Le cuivre Cu-a contenant de l'oxygène, existe sous forme de trois nuances normalisées dépendant du procédé d'affinage : Cu-a1, Cu-a2 et Cu-a3. Le cuivre Cu-a1, obtenu par affinage électrolytique, contient une teneur en cuivre supérieure ou égale à 99,90% en masse. Il a de hautes conductivités électrique et thermique et est destiné à des usages électriques (ou thermiques). Il est difficilement soudable et ne peut être utilisé sous vide. Les deux autres nuances (Cu-a2: $\text{Cu} \geq 99,90\%$ et Cu-a3: $\text{Cu} \geq 99,85\%$) sont obtenues par affinage thermique, seule la première étant de conductivité électrique garantie. Ces cuivres sont cependant moins utilisés que le cuivre Cu-a1, en raison de présence d'un taux d'impuretés plus élevé.
- Le cuivre Cu-b, exempt d'oxygène et désoxydé au phosphore, contient au moins 99,90% en masse de cuivre et entre 0,013% et 0,050% (Cu-b1) ou entre 0,004% et 0,012% (Cu-b2) de phosphore. Ce cuivre présente de bonnes caractéristiques mécaniques (bonne soudabilité, meilleure tenue mécanique à température moyenne), mais sa conductivité électrique est limitée par rapport au cuivre Cu-a.
- Le cuivre Cu-c, exempt d'oxygène et de désoxydant résiduel, se présente sous forme de deux nuances qui se distinguent par leur niveau de pureté, Cu-c1 (cuivre pur) qui comprend 99,95 % de cuivre et Cu-c2 (cuivre extra pur) qui en comprend 99,99 %. Ce cuivre est utilisé à la fois pour des usages électriques (ou thermiques) et mécaniques (conductivité élevée et aussi bonne soudabilité) [15].

Le présent travail, s'intéresse à la première catégorie de cuivre, plus précisément le cuivre Cu-A1 désigné par sa norme ISO Cu-ETP (Electrolytic Tough Pitch). En raison de sa haute conductivité électrique, ce cuivre est principalement dédié à la fabrication de produits à usage électrique : fils, câbles, ...

II.2. Propriétés physiques

Le cuivre est un matériau diamagnétique de structure cristalline cubique à faces centrées (C.F.C.); son paramètre de maille est égal à $3,608\text{\AA}$ à 18°C . Il a une température de fusion de 1084°C , une masse volumique variant entre $8,89.103$ et $8,92.103\text{ kg/m}^3$ à 20°C (selon la teneur en oxygène) et une résistivité électrique variant entre $1,724$ à $1,682\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ à 20°C . Les propriétés essentielles de ce matériau sont ses conductivités électrique et thermique, qui sont particulièrement élevées (respectivement de l'ordre de $101\ \%\text{IACS}$ et de $391\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ à 20°C) ; cette dernière est très influencée par la teneur en oxygène. Le coefficient de dilatation linéaire (de 20° à 300°C) est de $17,6.10^{-6}\ \text{K}^{-1}$, c'est-à-dire 50% plus important que l'acier [15].

Tableau II.1. Les principales caractéristiques physiques de cuivre [15].

Propriétés physiques			
Enthalpie de fusion	211850J/kg		
Température de fusion	1065°à1083°C		
Coefficient de dilatation (en$10^{-6}\ \text{K}^{-1}$)	de 25°à100°C		16,8
Capacité thermique massique (enJ/(Kg.K))	20°C		386
Conductivité thermique (enW/(m.K))	20°C		400
Conductivité électrique (%IACS)	(état recuit)	20°C	100 à 102,5
	(état écroui)	20°C	97
Résistivité électrique ρ (en$\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	(état recuit)	20°C	1,724 à 1,682

II.3. Propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques ne dépendent pas de la nuance de cuivre considérée et très peu de la forme des produits (laminés, tubes, barres, fils). Elles sont surtout influencées par le taux d'écroutissage et de la pureté du matériau [15].

Tableau II.2. Les principales caractéristiques mécaniques de cuivre [15].

Propriétés mécaniques					
Etat de livraison	Symbole AFNOR	R_{p0,2} (MPa)	R_m (MPa)	Allongement (A%)	Dureté Vickers HV
Recuit	OS	70	230	45	50
1/4 dur	H11	190	270	25	80
1/2 dur	H12	250	300	14	100
4/4 dur	H14	320	350	6	110
<p><i>L'état de recuit signifie 0% d'écroutissage: état AFNOR</i> <i>1/4 dur: 10% d'écroutissage: état AFNOR H11</i> <i>1/2 dur: 25% d'écroutissage: état AFNOR H12</i> <i>4/4 dur: 50% d'écroutissage: état AFNOR H14</i> <i>R_{p0,2} limite élastique à 0,2% d'allongement</i> <i>R_m résistance mécanique</i></p>					

II.4. Traitement thermique de cuivre et ses alliages

Les traitements thermiques confèrent aux produits métalliques les propriétés nécessaires pour leur transformation, leur mise en œuvre ou leur utilisation. Ils constituent donc une opération métallurgique fondamentale.

Les paramètres principaux des traitements thermiques sont :

- La température maximale;
- La durée de maintien à cette température;
- La nature du milieu de refroidissement.

L'exécution des traitements thermique ne présente pas de difficultés particulières. Elle est même relativement aisée, du fait de l'absence de transformation allotropique, et les températures nécessaires ne sont pas très élevées (généralement à environ 800°C).

Le terme de recuit comporte l'idée de réaliser un état stable à froid (température ambiante) ou de tendre vers cet état s'il a été perturbé par des traitements thermiques ou thermomécaniques antérieurs. En outre, du point de vue mécanique, l'état stable comporte l'absence de contraintes résiduelles. Le recuit donc, plus généralement est un traitement adoucissant.

Si le métal ou l'alliage présente un changement de phase entre la température de recuit et la température ambiante, la vitesse de refroidissement doit être suffisamment faible pour que cette transformation puisse s'accomplir. Lorsque n'existent pas de tels points de transformation, la vitesse de refroidissement est indifférente.

Selon l'état initial du matériau et les propriétés recherchées, on distingue plusieurs sortes de recuit [16].

Parmi ces recuits:

II.4.1. Recuit de recristallisation

Ce recuit s'effectue sur les produits écrouis pour leur restituer la malléabilité nécessaire, soit pour la poursuite des opérations de façonnage (recuit intermédiaire), soit pour une utilisation (recuit final).

La recristallisation résulte de la formation et de la croissance de germes de nouveaux cristaux dans la région les plus perturbée par la déformation à froid (joint de grains, plans de glissement). Ces cristaux sains se développent progressivement aux dépens des anciens grains déformés, et la recristallisation proprement dite est terminée lorsque cette substitution est complète.

La recristallisation se produit dans un certain intervalle de températures dont l'étendue et les valeurs extrêmes dépendent de la composition de l'alliage, de la durée du recuit et, surtout du taux d'écrouissage: la température de recristallisation est d'autant plus faible que l'écrouissage est plus fort; elle est abaissée par des maintiens suffisamment longs.

Dans l'échelle des températures et, à un moindre degré toutefois, dans celle des temps, la recristallisation est généralement précédée d'une *restauration* (élimination de défauts réticulaires et de contraintes internes sans modification apparente de la structure) et suivie d'une croissance des grains (développement de certains cristaux aux dépens des autres) (**Figure II.1**) Ces différentes

étapes empiètent fréquemment les unes sur les autres et il est souvent malaisé de les distinguer.

Un écrouissage minimal est nécessaire pour que la recristallisation se produise. Dès que ce taux est atteint (écrouissage critique), des germes peu nombreux se développent et envahissent, sans se gêner mutuellement, toute la masse du métal, donnant ainsi une structure à gros grains. L'écrouissage critique est généralement très faible, de l'ordre de quelques %.

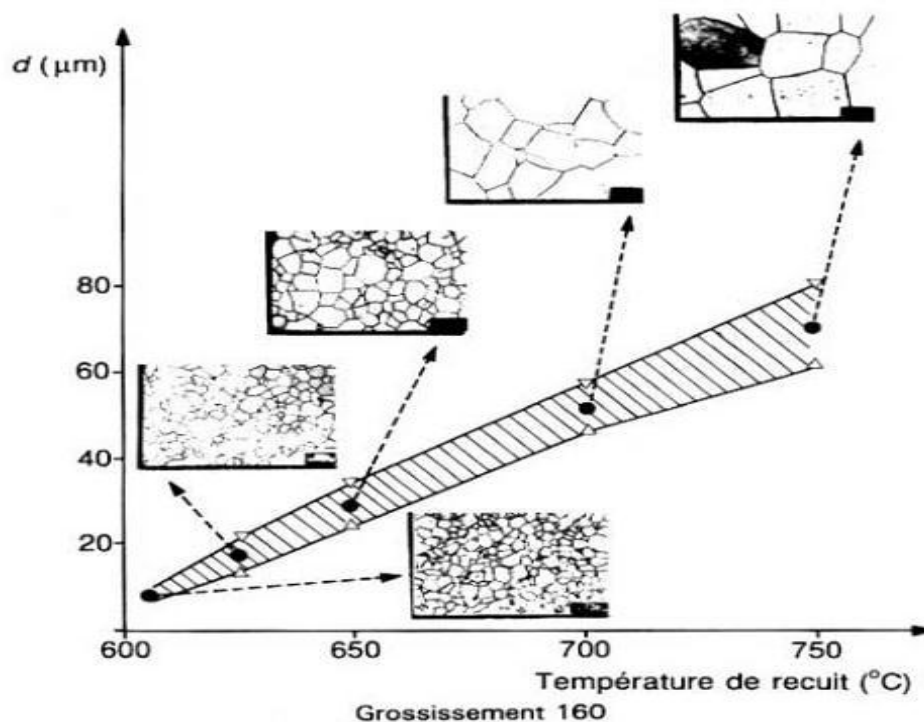


Figure II.1. Exemple d'évolution de la taille des grains recrystallisés en fonction de la température de recuit [16].

Pour des taux d'écrouissage supérieurs, le nombre de germes augmente et la recristallisation se termine avec des grains plus nombreux donc plus petits: pour une température et un temps de recuit donnés, la grosseur du grain de recristallisation est alors d'autant plus faible que l'écrouissage est plus fort (**Figure II.2**)

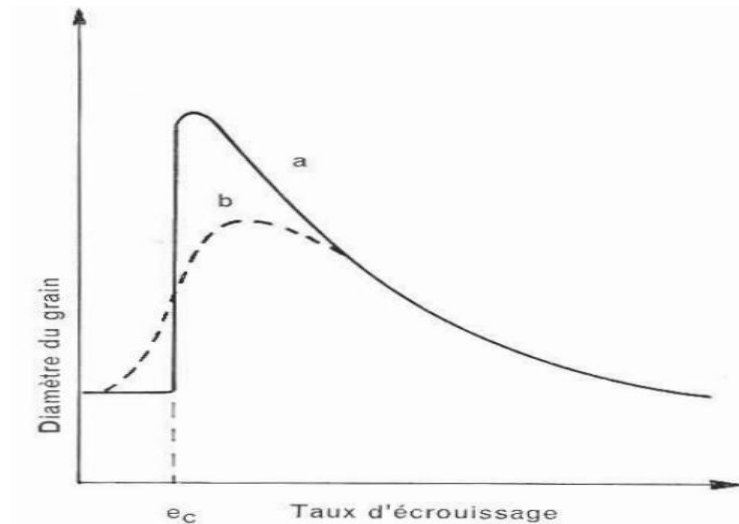


Figure II. 2. Variation de la grosseur du grain en fonction du taux d'érouissage pour des recuits à température et temps de maintien fixes [16].

Les données précédentes ne sont cependant valables que pour les métaux purs et les alliages constitués d'une seule et même phase depuis l'ambiante jusqu'à la température de recuit. Dans les alliages polyphasés, le recuit détruit l'érouissage, mais la croissance des nouveaux grains d'une phase est généralement entravée par les autres phases. Parallèlement à l'évolution structurale décrite ci-dessus, les propriétés mécaniques se modifient comme l'indique la **Figure II.3**.

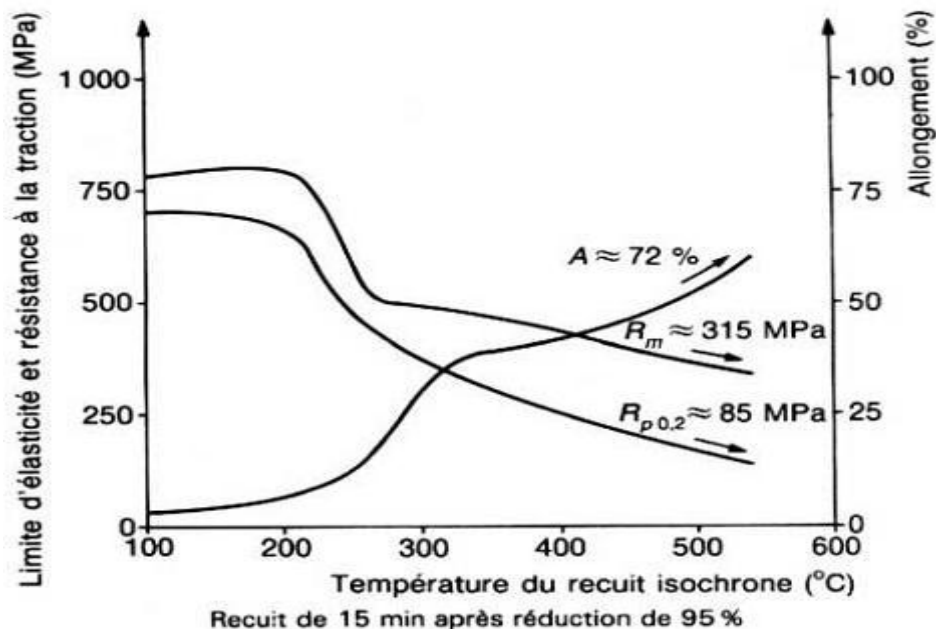


Figure II.3. Évolution de la force à la rupture (R_m), ($R_{p0,2}$) et l'allongement ($A\%$) en fonction de la température de recuit [16].

II.4.1.2. Recuit ménagé

C'est un recuit effectué sur des demi-produits intentionnellement très écrouis. Par un réglage convenable de la température et de la durée de maintien, il est possible d'obtenir des caractéristiques mécaniques précises, intermédiaires entre celles de l'état écroui et celle de l'état complètement recuit. De plus, en raison principalement de la finesse de la structure ainsi obtenue, les allongements à la rupture après recuit ménagés ont très supérieurs à ceux du même produit écroui d'égale résistance à la traction (**Figure II.4**) [17].

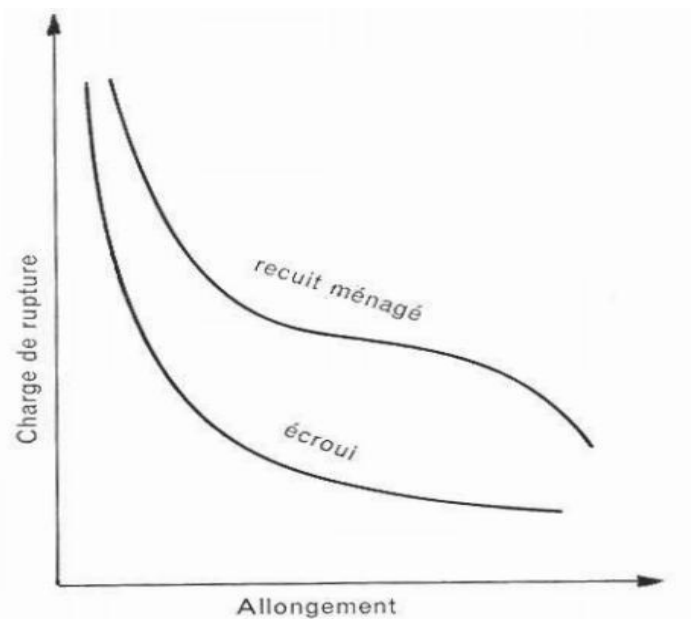


Figure II. 4. Charge de rupture en fonction des allongements pour les états écrouis et recuit ménagé [16].

II.5. Le zinc

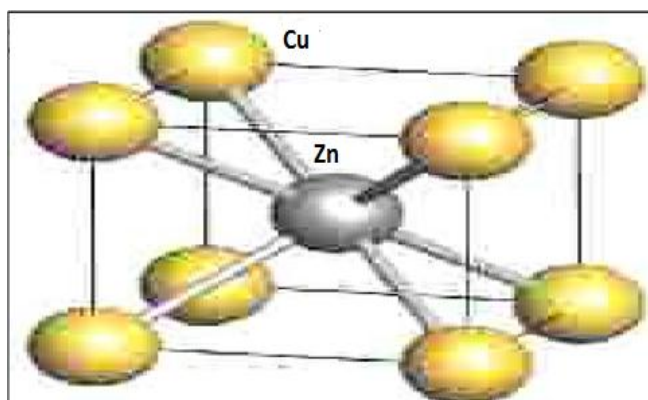
Le zinc est un métal relativement mou, à basse température de fusion et a température de recristallisation inférieure à la température ambiante. Chimiquement, il est réactif dans bon nombre de milieux courants et, donc, exposé à la corrosion. L'acier galvanisé est simplement un acier au carbone ordinaire qui a été recouvert d'une mince couche de zinc: le zinc se corrode et protège l'acier. Les usages courants de l'acier galvanisé sont bien connus (tôles, barrières, moustiquaires, vis, etc.). Parmi tous usages courants des alliages de zinc figure la fabrication de cadenas, de certaines pièces d'automobile (poignées de porte et calandres) et de matériel de bureau [16].

Tableau II.3. Les différentes propriétés physiques et mécaniques du zinc [16].

Propriétés	Caractéristiques
Numéro atomique	30
Masse atomique	67,37
Masse volumique (à 25°C)	7,14 g/cm ³
Température de fusion	419,5 °C
Température d'ébullition	907 °C
Tension de vapeur	0,139 mmHg (à 419,5 °C)
Conductivité thermique	113 W/(m.K)
Résistivité électrique à 20°C	5,9 μΩ.m
La résistance à la traction	145 – 186 Mpa
La limite d'élasticité	40 – 50 Mpa

II.6. Les alliages à base cuivre-zinc (les laitons)

Les laitons sont des alliages de cuivre contenant de 5 à 45% de zinc. Le cuivre a une solubilité élevée pour le zinc et les alliages sont très homogènes. Le laiton avec moins de 28% de zinc est appelé le laiton rouge et est tout particulièrement indiqué pour l'usinage. Lorsque le contenu en zinc augmente, la couleur rougeâtre du cuivre prend celle plus jaune du laiton. Les alliages contenant jusqu'à 37% de zinc sont constitués d'une solution α solide et sont adéquats pour le façonnage à froid. Si son contenu en zinc est plus élevé, le laiton devient de moins en moins ductile et donc plus facile à usiner. A partir de 38% de zinc, les alliages montrent une microstructure biphasée α - β adéquate pour le façonnage à chaud. En ajoutant de l'aluminium, du manganèse, du fer, du nickel et de l'étain, des types de laiton spéciaux peuvent être produits ayant des propriétés chimiques ou mécaniques spécifiques. Des additions de petites quantités de plomb améliorent l'usinabilité du laiton.

**Figure II.5.** Structure cubique centrée de la phase bêta du laiton Cu-Zn [18].

Selon leur contenu en zinc, différents laitons sont utilisés dans différents domaines d'application: des montres et bijoux à la technologie électronique (CuZn5), aux ressorts, vis, tiges, des pièces de matrices de forgeage (CuZn30) aux armatures (CuZn40) et paliers pour les boîtiers de pompes résistants à l'eau de mer (CuZn10Sn2) [18].

II.6.1. Diagramme d'équilibre

Le diagramme des alliages cuivre-zinc à forte teneur en cuivre est donné par la **Figure II.6**. La solidification se fait de 100 à 67.5% Cu en solution solide α ; de 67.5 à 62% en la même solution solide α avec une réaction péritectique finale donnant une autre solution β à 63% au plus de cuivre; au-dessous de 62% de cuivre donnant directement la solution solide β , puis par une nouvelle réaction péritectique une troisième phase γ . Immédiatement après solidification, l'alliage est donc, selon la teneur en zinc, formé d'une solution solide α riche en cuivre, d'une phase β à base de CuZn, d'une phase γ à base de Cu₅Zn₈ ou d'un mélange $\alpha\beta$ ou $\beta\gamma$. Lorsque la température baisse, le domaine se β rétrécit, mais sans disparaître complètement, et à une température qui, selon la composition, varie de 453 à 470°C, survient une transformation: la solution cubique centrée nonordonnée se transforme en une solution solide de même structure, mais ordonnée [19].

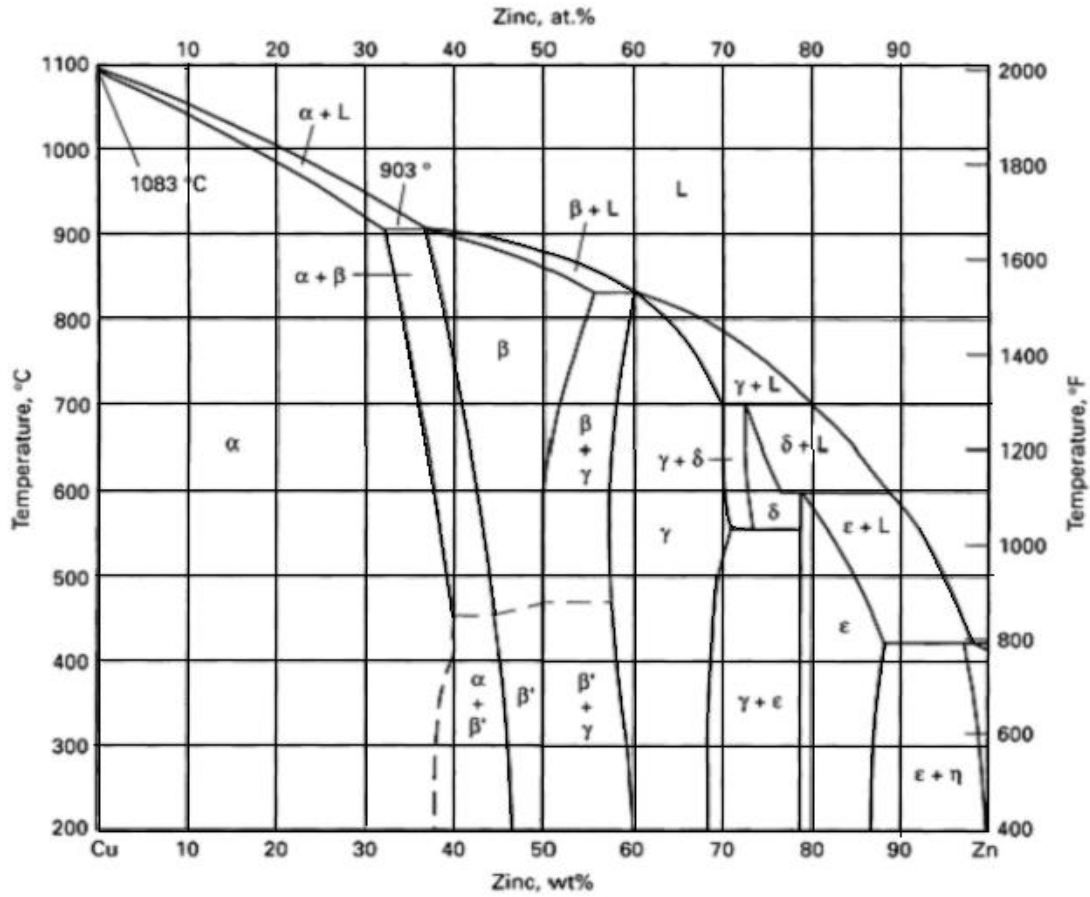


Figure II.6. Diagramme de phase du système Cuivre-Zinc [20].

Le solidus des laitons est toujours très voisin du liquidus; les deux courbes sont même pratiquement confondues entre les teneurs de 38 et 50% de zinc. Pour des teneurs de zinc élevées, il y a formation de la phase β avec réseau CC et aux températures élevées, la distribution des atomes de la phase β est désordonnée, en cet état la phase β est plastique. Aux températures inférieures à 454 ou 468°C, la disposition des atomes de cuivre et de zinc dans cette phase devient ordonnée et la phase est alors notée β' . A la différence de la phase β la phase β' est plus dure et plus fragile. A partir de 50 % de zinc, il y a formation de la phase γ avec un réseau compliqué et une grande fragilité, ce qui rend la déformation très mauvaise.

En général, les alliages avec une teneur en zinc supérieure à 50%, ne sont pas techniquement intéressants. Le plus souvent, la structure de ces laitons se compose de phase α ou $\alpha + \beta'$ [19].

II.6.2. Les laitons simples ou (monophasés α)

On a coutume d'appeler laitons simples les laitons qui ne renferment que du cuivre et du zinc. La gamme des laitons simples couramment commercialisés comprend principalement quatre alliages: CuZn15, CuZn30, CuZn36 et CuZn40.

Le diagramme d'équilibre Cu-Zn (figure II.1) indique une solubilité maximale de 39 % Zn vers 450 C°, qui décroît à plus haute et à plus basse températures. Mais dans les plaques ou billettes coulées, il existe des proportions croissantes de phase β , hors équilibre, pour une teneur en zinc supérieure à 30 % et, en pratique industrielle, il devient impossible d'éliminer totalement cette phase pour atteindre 100 % de phase α homogène au-delà de 37 % de zinc.

Ces alliages se distinguent à la fois par leur aspect et par leurs propriétés d'usage: caractéristiques, mécaniques, aptitude à la déformation à froid, au moulage, à l'usinage.

Le CuZn15 a une couleur jaune remarquable très proche de celle de l'or. Les autres laitons simples couvrent les différentes teintes de jaune dont l'intensité varie avec la teneur en zinc [21].

II.6.3. Les laitons complexes (spéciaux)

Les laitons complexes sont des alliages à base de Cu et de Zn et alliés avec un ou plusieurs éléments d'addition tels que : Si, Al, Sn, Ni, Mn, Pb, Fe, As. L'introduction des éléments d'alliage, sauf le nickel, diminue la solubilité du zinc dans le cuivre et contribue à la formation de la phase β , c'est pourquoi en général, les laitons spéciaux sont considérés comme des laitons biphasés ($\alpha + \beta$) [21].

Les alliages du système binaire (Cu-Zn) possèdent une semble étonnant de caractéristiques, dont résistance mécanique, malléabilité et conductivité...; ils possèdent, de plus, de bonnes propriétés quant aux déformations à chaud et à froid, des propriétés anti-étincelles et une faible perméabilité magnétique, le tableau suivant indique la possibilité d'exécution de certain type de laitons simples et ceux de plomb pour des différentes applications :

Tableau II.4. La possibilité d'exécution de certain type de laitons simples et ceux de plomb pour des différentes applications [21].

	Laitons simples	Laiton de plomb			
	Cu>63%	Cu<63%	CuZn40	CuZn39	CuZn37
Déformation à froid	Excellent	Moyen	Moyen	Moyen	Très bon
Déformation à chaud	Moyen	Excellent	Très bon	Excellent	Très bon
Produit usinés	Moyen	Très bon	Excellent	Excellent	Très bon
Produit de fonderie	Très bon	Très bon	Moyen	Très bon	Moyen
Soudage	Excellent	Pas adapté	Pas adapté	Pas adapté	Pas adapté
Brassage tendre	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
Brassage fort	Excellent	Excellent	Très bon	Très bon	Très bon

II.7. Les performances du fil de cuivre revêtu en zinc

Historiquement, le cuivre était utilisé comme électrode outil de l'électroérosion à fil. Puis est apparu le laiton, dont les propriétés mécaniques et les propriétés érosives sont meilleures. Les fils revêtus ont suivi pour spécialiser les fonctions de la couche de l'âme. En général, des brevets relatifs aux propriétés et au processus de fabrication ont été disposés :

PFAU [2] a été parmi les premiers à découvrir l'avantage que procure un revêtement de zinc sur un fil de cuivre.

L'explication donnée par PFAU à l'avantage d'une couche de zinc par rapport à une surface de cuivre, été l'effet de bouclier thermique produit par la vaporisation du zinc, permettant d'augmenter la puissance d'érosion sans rompre le fil. Un effet aurait été que les ponts métalliques faisant court-circuit entre le fil et la pièce auraient été rapidement fondus ; la température de fusion du zinc étant

faible. Le brevet a servi de base de fabrication et à la vente des fils constitués d'une âme de cuivre ou de laiton, et d'un revêtement en zinc. Ce sont les fils zingués.

BRIFFOD [22], mentionne l'utilité de disposer d'un fil à couche diffusagée, dans un état écrouit. L'augmentation de la résistance mécanique du fil due à son tréfilage à froid permet d'augmenter la force de la traction sur le fil pendant l'usinage, sans rompre ce dernier, ce qui a pour effet d'augmenter la vitesse d'érosion.

GROOS [23] a décrit une manière intéressante de diffuser une couche de zinc sur une âme de cuivre ou d'alliage de cuivre permettant d'obtenir un fil tel que celui breveté par PFAU.

Afin de combiner les étapes de dépôt de zinc et de diffusion, **LACOURCELLE** [24] a imaginé de faire passer l'âme du fil :

- Dans un bain de zinc en fusion, simultanément à un échauffement de fil par effet Joule.
- Dans une atmosphère contenant des vapeurs de zinc, simultanément à un échauffement de fil.
- Dans une cellule d'électrodéposition de zinc à partir de sels fondus.

II.8. Tréfilage des fils

C'est essentiellement le cuivre qui est fabriqué sous forme de fils pour usages électriques et électroniques. Ces fils de cuivre sont presque toujours utilisés en deuxième transformation en grandes longueurs (câbles et fils téléphoniques, fils conducteurs isolés, câbles d'énergie, fils émaillés pour bobinages, etc.). Ils sont employés le plus souvent sous forme de fils fins ou extra-fins (diamètre moyen de l'ordre de 0,25 mm pour fils nus et étamés ; 0,11 mm pour fils émaillés). Des fils extra-fins, jusque $\varnothing 0,012$ mm, peuvent être fabriqués grâce à l'excellente ductilité du cuivre.

Les ébauches peuvent être tréfilées à froid jusque $\varnothing 0,25$ mm sans recuits intermédiaires, sauf si les caractéristiques du produit final l'imposent (par exemple: téléphonie). En fonction de l'utilisation, un recuit au diamètre final est effectué ou non. Les recuits, en particulier aux diamètres les plus élevés, peuvent être effectués en pots sur tourets, sous vide ou en atmosphère contrôlée, dans des fours cloches classiques, à des températures relativement basses (entre 160 et 300 °C), et de longue durée (8 à 12 h). Ils peuvent aussi, en particulier être effectués au passage, en continu, dans un dispositif monté en série avec la machine à tréfiler: les fils y sont recuits (figure 1) par la chaleur dégagée par effet de Joule [25].

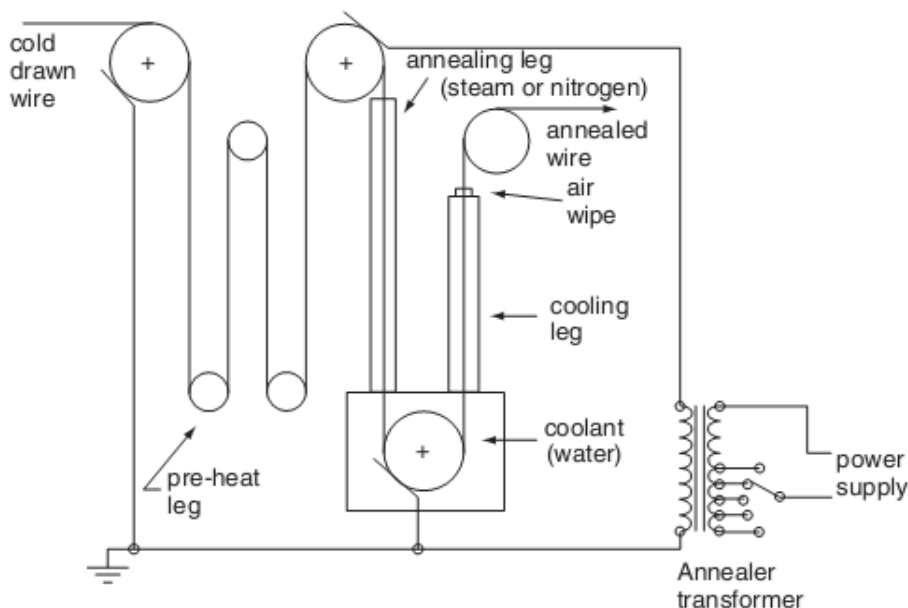


Figure II.7. Schéma du dispositif de recuit pour les fils de cuivre [26].

II.8.1. Machines à tréfiler

Le tréfilage du cuivre est habituellement effectué sur des machines à tréfiler multiples.

Celles-ci peuvent être :

- sans glissement, ce qui peut être obtenu de deux manières différentes :
 - ✓ en accumulant du fil sur chaque cabestan,
 - ✓ en n'en accumulant pas mais en asservissant la vitesse des cabestans les uns par rapport aux autres ;
- à glissement (moins chères que les précédentes et convenant bien au cuivre) ; dans ce cas, les cabestans d'entraînement du fil – immergés ou arrosés par le lubrifiant de tréfilage (de l'huile soluble) – sont montés soit en tandem (1 seul cabestan par arbre), soit en cône étagé (4 à 5 cabestans par arbre) ; ces cabestans sont le plus souvent en céramique, notamment pour les machines travaillant les fils de $\varnothing < 1$ mm ; dans les autres cas, ces cabestans sont en acier recouvert d'un revêtement dur (oxyde de chrome ou carbure de tungstène).

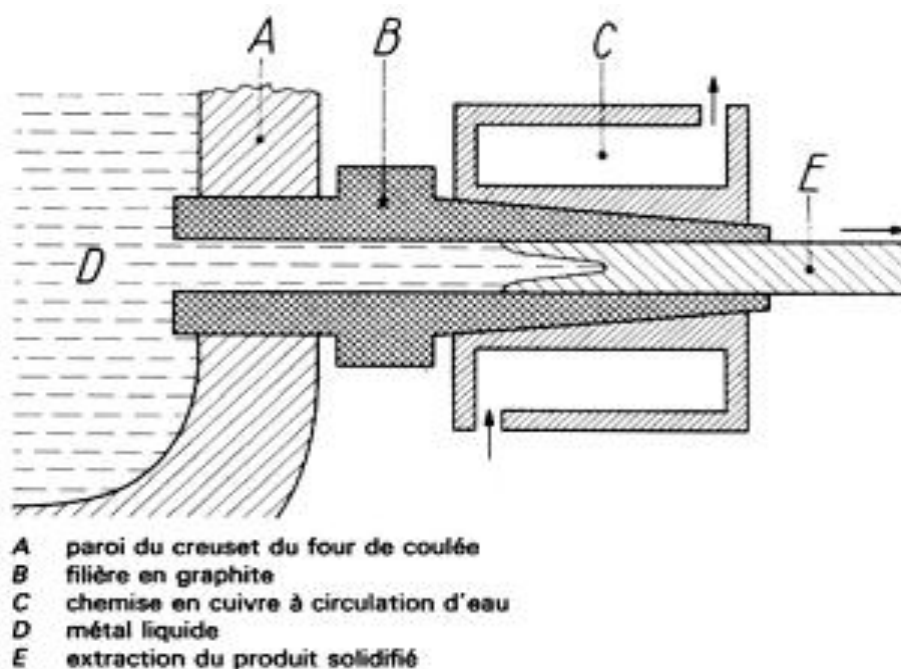


Figure II.8. Coulée continue horizontale en lingotière à filière de graphite [26].

Le taux d'allongement $[(S/s) \times 100]$ au passage de chaque filière s'exprime habituellement en fonction des sections d'entrée (S) et de sortie (s), et est de l'ordre de 24 %. Les machines d'ébauchage, réduisant le fil Cu de $\varnothing 8$ mm à $\varnothing 2$ mm, comportent couramment 13 filières. Les machines qui le réduisent de $\varnothing 2$ mm à $\varnothing 0,25$ mm par exemple en comportent 17 à 20. Pour en assurer un refroidissement convenable malgré les grandes vitesses de tréfilage pratiquées, la lubrification des filières est assurée par des émulsions aqueuses, à base pétrolière, correctement additivées, ou à base de corps gras naturels [26].

II.9. Galvanisation des fils

La galvanisation des fils est un procédé intermédiaire entre la galvanisation au trempé et celle des tôles. En effet, il s'agit d'un procédé continu comportant éventuellement un traitement thermique avant le passage au bain de zinc (pur en général).

Les fils sont traités en nappe, c'est-à-dire qu'une vingtaine de bobines sont déroulées et traitées en parallèle. Les fils sont dits clairs (galvanisés à l'état écroui de tréfilage) ou recuits (galvanisés après recuit en ligne). Pour certains usages, les fils sont retréfilés après la galvanisation, cela nécessitant une excellente adhérence du revêtement. D'une façon générale, la mise en œuvre des fils se fait par pliage, torsion, enroulement... de façon parfois sévère, nécessitant donc une bonne aptitude à la déformation mécanique du revêtement sans écaillage.

Les fils galvanisés sont groupés en trois classes (norme NF A 91-131) :

Classe A : galvanisation ordinaire (pas d'exigence particulière en charge de zinc ou en continuité de revêtement);

Classe B : galvanisation soignée (charge minimale, continuité et adhérence) ; exemple : épaisseur du revêtement $0,75 \text{ g/dm}^2$ (fil doux $\varnothing 2 \text{ mm}$);

Classe C : galvanisation épaisse (charge de zinc nettement plus forte, 2 à 3 fois par rapport à la classe B) ; exemple : épaisseur du revêtement $2,10 \text{ g/dm}^2$ (fil doux $\varnothing 2 \text{ mm}$).

Le Galfan (zinc à 5% Al) pour les tôles galvanisées peut également être utilisé pour les fils [27].

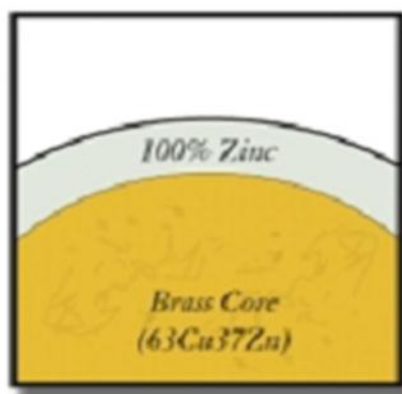


Figure II.9. Fil en laiton galvanisé [27].

CHAPITRE III.
Dispositifs et techniques
Expérimentaux

Cette partie est consacrée à détailler les différentes étapes de l'étude expérimentale ainsi que la présentation des dispositifs expérimentaux exploités ou réalisés au niveau de laboratoire de département métallurgie, ainsi qu'au niveau des laboratoires de métallurgie au sein des entreprises BCR et CATEL.

Les étapes de cette étude sont les suivantes :

- Traitements thermiques du fil sous vide.
- Observation métallographique en microscopie optique et électronique à balayage.
- Mesure de la résistivité électrique.
- Essai de microdureté.
- Essai de traction.

III.1. Matériau étudié

Le matériau étudié est un fil de section $\Phi=0,25$ mm à base de cuivre revêtu avec une couche de zinc d'une épaisseur 10 μ m, destiné au découpage par étincelage érosif.

III.2. Traitement thermique

Les différents recuits ont été effectués dans un four sous vide, avec l'utilisation d'une atmosphère protectrice en azote (N₂).

On a mis le fil de cuivre zingué ($\Phi=0,25$ mm) dans le four, Les différents traitements ont été réalisés à trois températures à T=700, 750 et 800 °C pendant 30 minutes.

Les refroidissements se font dans le four (la porte de la chambre de four a été ouverte à la température T=125 °C).

Le but de nos traitements sous vide est d'éviter l'oxydation de fil.

Le four utilisé est de marque AICHELIN (Figure III.1), relié à une bouteille d'azote, et une pompe qui crée un vide primaire de 10⁻²bar (ou 7 mm Hg). Sa plage de service est située entre 500 et 1300 °C, et a la capacité de stabiliser ces températures pendant le temps désiré. Le four s'arrête automatiquement après le temps de maintien. La distribution homogène de la température est obtenue par la résistance entourant la chambre du four (à partir de la surface extérieure de la chambre).



Figure III.1. Four sous vide AICHELIN.

III.3. Préparation métallographique

La préparation métallographique des échantillons se fait à travers plusieurs étapes.

III.3.1. Prélèvement des échantillons

On découpe le fil de cuivre zingué de diamètre ($\Phi=0,25$ mm) à l'aide d'une pince, pour obtenir des petits morceaux de longueur entre 10 et 12 mm, Le tableau ci-dessous présente les échantillons à étudier:

Tableau III.1. Le choix des échantillons, abréviations, et positions.

		Type d'échantillon	Position
Fil neuf non utilisé		EH neuf	Horizontal
		EV neuf	Vertical
Fil usagé utilisé une fois		EH usagé	Horizontal
		EV usagé	Vertical
Fil neuf après le traitement thermique pendant 30 min	T=700°C	EH + (700°, 30')	Horizontal
		EV + (700°, 30')	Vertical
	T=750 °C	EH + (750°, 30')	Horizontal
		EV + (750°, 30')	Vertical
	T=800 °C	EH + (800°, 30')	Horizontal
		EV + (800°, 30')	Vertical

III.3.2. Enrobage

Les échantillons ont été enrobés à l'aide d'un mélange résine – durcisseur. Cette opération consiste à mettre les morceaux du fil dans un moule et ajouter le mélange résine – durcisseur, et ensuite laisser la résine se solidifier pendant quelques minutes. On a utilisé l'enrobage à froid pour éviter toutes transformations et changements structuraux.



Figure III.2. Echantillons enrobés.

III.3.3. Polissage mécanique

Il permet d'obtenir une surface plane, non rugueuse et d'éliminer la couche d'oxyde superficielle. Le polissage a été effectué en deux étapes :

- **Le pré-polissage**

Le pré-polissage de la surface à examiner est réalisé avec une polisseuse sous eau et des disques abrasifs de granulométrie P600 – P800 – P1000 – P1200. La vitesse de rotation est comprise entre 200 et 300 tours/min environ. L'échantillon subit une rotation à 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes de polissage. La durée de polissage est d'environ 2 minutes par granulométrie.

- **Le polissage de finition**

Cette opération permet d'améliorer davantage notre surface en utilisant des feutres imbibés de suspensions d'alumine diluées ; les grains avaient une taille entre 1 et 3µm avec une vitesse de rotation variant entre 150 et 250 tours/min.

Après le polissage, les échantillons ont été soigneusement séchés pour être prêts à l'attaque chimique.



Figure III.3. Polisseuse utilisée.

III.3.4. Attaque chimique

Le but essentiel de l'attaque chimique étant de révéler la microstructure de la surface de l'échantillon, nous vérifions au microscope optique que cette surface ne présente aucune rayure, afin que l'observation microscopique à venir soit plus nette.

Après polissage mécanique et de finition, nous avons procédé à deux attaques chimiques de la surface à l'aide :

- Une solution alcoolique d'acide nitrique (NITAL) : HNO_3 5% et 95% Alcool éthylique, pendant 30s pour observer la micro structure de la couche de zinc.
- Une solution alcoolique de chlorure ferrique : FeCl_3 5g, HCl 2 ml, Alcool éthylique 200 ml, pendant 40s pour observer la microstructure du cuivre et des phases α et β .

III.4. Méthodes d'examens métallographiques

III.4.1. Microscopie optique

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques lors de l'observation au microscope optique.

Elles se font à l'aide d'un microscope optique de la marque OPTIKA M-789 (Figure III.4) avec un agrandissement qui varie de 50 à 500. Ce microscope s'accompagne d'une caméra, d'un micro-ordinateur avec utilisation d'un logiciel de traitement d'image.

L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.

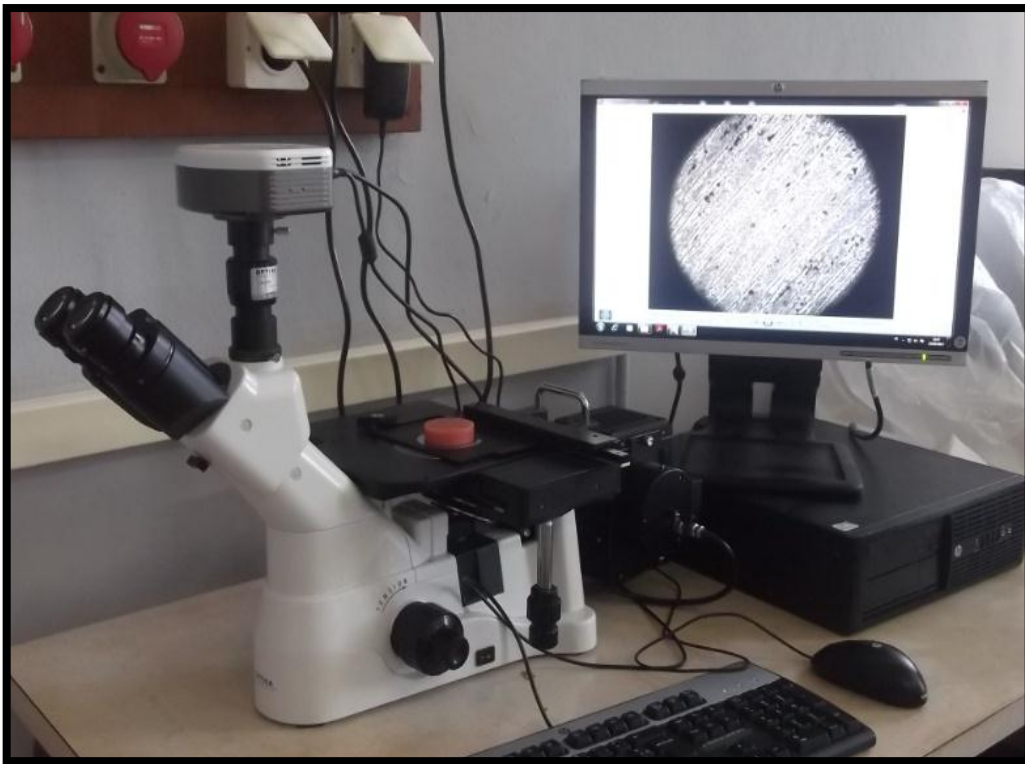


Figure III.4. Microscope optique OPTIKA M-789.

III.4.2. Traitement d'images numériques

Dans cette partie on calcule les proportions des phases constituant l'échantillon à partir des micrographies prises par microscopie optique et à l'aide d'un logiciel de traitement d'image. Le principe de la méthode est basé sur le contraste créé par la différence du pouvoir réflecteur des constituants. Cette technique nécessite des attaques métallographiques chimiques appropriées, dans notre cas nous avons utilisé deux solutions le nital et le chlorure ferrique (Attaque chimique). Le logiciel utilisé s'appelle IMAGE J.

III.4.3. Microscopie électronique à balayage

Pour affiner l'investigation des microstructures et confirmer les résultats obtenus par Microscopie optique, on a été appelé à utiliser la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) (**Figure III.5**) investigation réalisée à l'université de TIZI OUZOU (Mouloud Maameri) le microscope électronique utilisé est de type JEOL JSM- 6360 LV en utilisant le signal produit par l'émission d'électrons secondaires qui sont sensibles au micro relief de la surface optique. Il est couplé à un système de microanalyse (EDX).

Les échantillons doivent présenter une conductibilité superficielle de l'électricité pour écouler les charges.

Le principe général du microscope électronique à balayage (MEB) consiste à focaliser, à l'aide d'une sonde électronique, un faisceau très fin d'électrons (appelés électrons primaires) sur une aire réduite de la surface de l'échantillon, ainsi l'aire totale qu'on désire explorer est balayée point par point par le faisceau électronique.

L'interaction électrons – matière donne lieu à divers rayonnements spécifiques (électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons transmis, électrons Auger et rayons X) qui transportent des informations sur l'objet dont ils sont issus le traitement de ces rayons permet de déduire la description de l'objet traité.

L'observation des fasciés de rupture aussi a été réalisée par le (MEB).



Figure III.6. Microscope électronique à balayage MEB.

III.5. Caractérisation électrique par mesure de la résistivité électrique

La résistivité électrique ρ est la caractéristique la plus utilisée pour rendre compte du comportement électrique d'un métal. Cette caractéristique est fortement influencée tant par la température, que par la microstructure et la composition du métal.

Les mesures de la résistivité électrique se fait par le dispositif qui est présenté sur la **Figure III.7** Ce dispositif est composé d'un générateur stabilisé numérique (1) qui fournit un courant contenu qui peut être compris entre 0.1A à 9.9A, et d'un millivoltmètre digital (2) pour mesurer la tension.

On réalise un circuit électrique simple, On a un fil de cuivre zingué (6) relié par deux pinces +(3) et -(4), les deux crochets (5) sont placés sur le fil avec une distance mesurable par une règle (7), On laisse passer un courant continu dans ce circuit et on relève la tension U (affichée sur la partie digitalisée de millivoltmètre). Ce qui nous permet d'avoir la résistance de notre fil échantillon.

En connaissant sa section S , et sa longueur L , on calcule sa résistivité électrique comme suit.

$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{S}{L} .$$

Avec :

- ρ ($\mu\Omega.cm$) : la résistivité électrique
- U (mV) : la tension
- I (mA) : l'intensité de courant
- S (cm^2) : la section de fil
- L (cm) : la longueur de fil

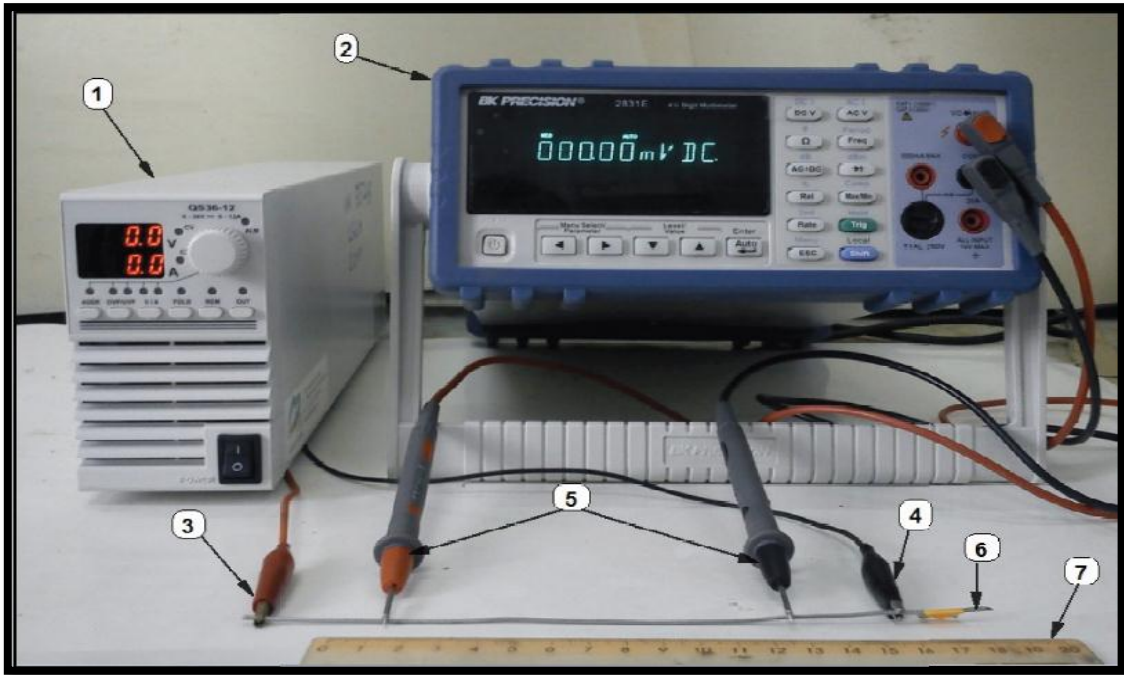


Figure III.8. Le dispositif de mesure de la résistivité électrique.

III.6. Caractérisations mécaniques

III.6.1. Microdureté

L'essai de microdureté est réalisé au niveau du département. Le microduremètre utilisé est de marque 'SHUMATZU HMV-M3' montré dans la **Figure III.9**. L'HMV-M3 utilise le principe de l'empreinte de dureté.



Figure III.7. Microduremètre SHIMATZU HMV-M3.

Les essais de microdureté sont destinés à définir les propriétés à l'intérieur des grains, soit de la matrice, soit de ses divers constituants. L'essai décrit sur la **Figure III.8** utilise un pénétrateur de type Vickers en diamant. Le diamant laisse une empreinte carrée et l'on calcule la moyenne des deux diagonales, mesurées, de l'empreinte.

Un choix judicieux de la charge et du temps d'appui permet de mesurer la dureté VICKERS par la mesure de la moyenne des diagonales, à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1854,4 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Avec $d = \frac{d1+d2}{2}$

d (μm) : est la moyenne des diagonales.

F (kgF) : est la force appliquée.

Dans notre étude, nous avons effectué un balayage le long de l'échantillon, en prenant pour chaque échantillon trois (3) valeurs dont on calcule la moyenne en HV, et pour cela, on a appliqué une charge de 25 g pendant 10 secondes, sans choc ou vibration.

L'empreinte est réalisée à l'aide du pénétrateur pyramidal en diamant dont la base est carrée et l'angle au sommet égale à 136° .

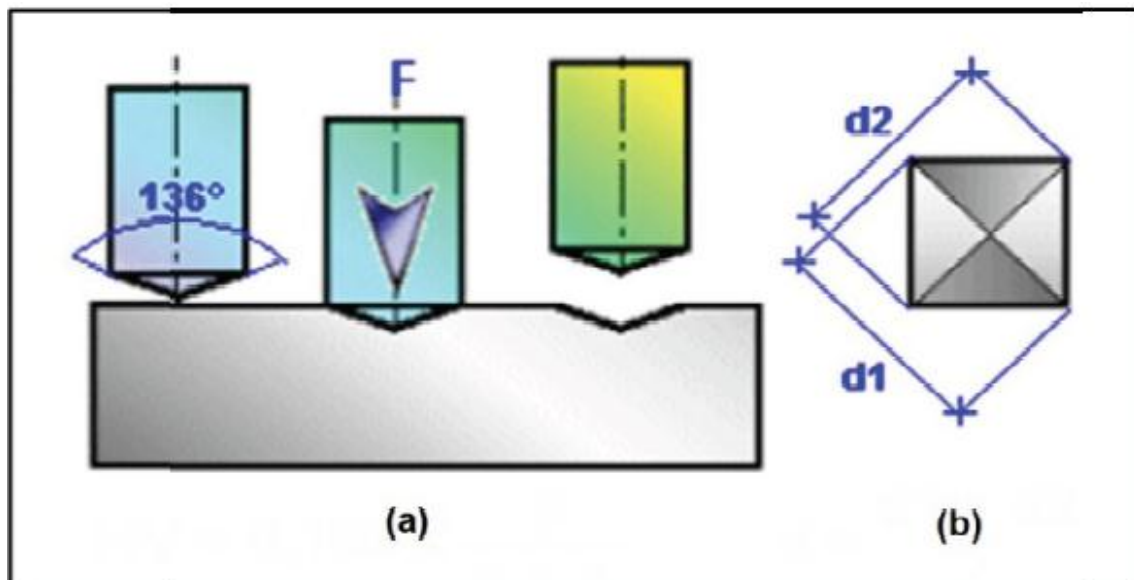


Figure III.8. Exécution et mesure de la microdureté Vickers.

Le choix d'une charge égale à 25 gr nous a permis de prendre la mesure soit dans le substrat à base de cuivre soit dans le revêtement riche en zinc comme le montre dans la **Figure III.9**.

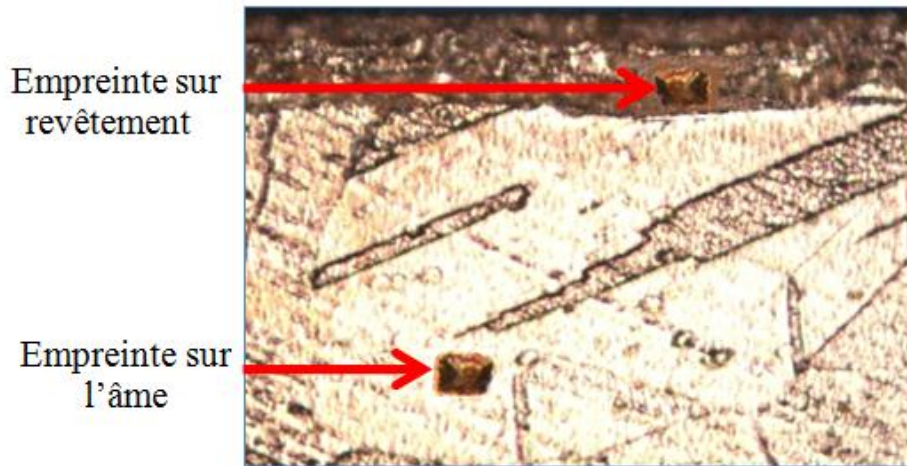


Figure III.9. Empreintes du microduromètre sur l'échantillon.

III.6.2. Essais de traction

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de cette éprouvette d'essai. Cet essai est réalisé à l'aide d'une machine qui enregistre les efforts. Elle permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile.

III.6.2.1. La machine d'essai utilisée

La machine utilisée est celle du laboratoire de l'entreprise CATEL de OUED SMAR (**Figure III.10**), elle est composée d'un bâti de charge, afficheur de position et afficheur de la traverse, d'un dispositif électronique de pilotage, un dispositif électronique pour la mesure de force, dont la commande peut être faite manuellement ou par un moteur électrique.

Le bâti de charge de la machine d'essais forme avec le boîtier de l'électronique de mesure et de contrôle l'élément de base des différents essais de matériaux.

Dans notre expérience, on a utilisé des éprouvettes qui sont des fils de diamètre $D_0 = 0,25$ mm et de longueur $L_0 = 200$ mm.



Figure III.10. Machine de traction.

III.6.2.2. Courbe de traction conventionnelle

La courbe de traction est dite conventionnelle lorsque l'on rapporte respectivement les mesures de force et d'allongement aux valeurs initiales de l'aire de la section S_0 et de la longueur L_0 de l'éprouvette. Ainsi, la courbe de traction conventionnelle représente l'évolution de la contrainte $R = F/S_0$ en fonction du taux d'allongement $e = (L-L_0)/L_0$.

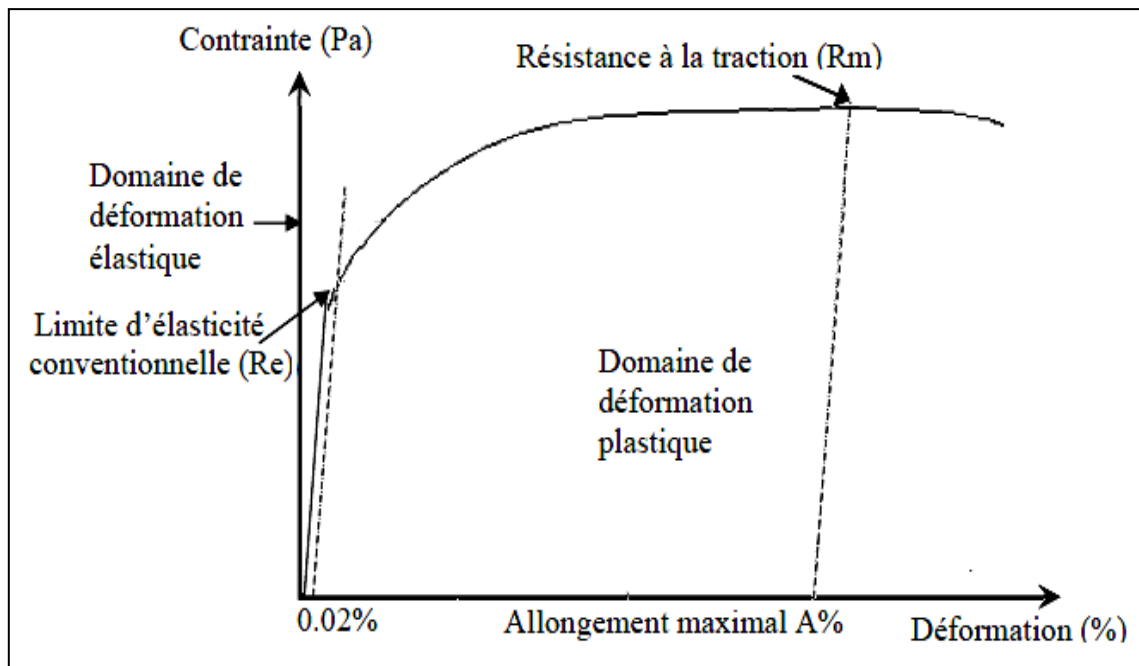


Figure III.11. Courbe conventionnelle de traction.

L'interprétation des résultats repose sur le *dépouillement de la courbe de traction* qui représente l'allongement en fonction de la progression de la charge de traction (Figure III.11.). On distingue trois domaines :

A. Domaine élastique :

La déformation est proportionnelle à la charge jusqu'à une valeur limite (F_e) selon la loi de Hooke :

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Avec :

σ : La contrainte exercée lors de l'essai ;

ε : La déformation rationnelle ($\varepsilon = \Delta L / L$) ;

E : le module de Young, appelé aussi module d'élasticité.

B. Domaine plastique qui commence dès que la charge dépasse F_e . Le rapport entre la charge et l'allongement augmente. Si l'effort cesse l'éprouvette conserve son allongement ; la déformation est alors permanente. Dans certains cas, un palier se produit durant lequel l'allongement de l'éprouvette continue à augmenter sans que la charge augmente.

C. Rupture de l'éprouvette.

L'essai de traction permet de déterminer les propriétés mécaniques du FIL via les grandeurs dans le tableau suivant

Tableau III.2. Caractéristiques de l'essai de traction.

Caractéristiques de traction	Formules de calculs
Limite élastique apparente R_e	R_e (MPa) = F_e (N) / S_0 (mm²)
Résistance à la rupture	R_m (MPa) = F_m (N) / S_0 (mm²)
Allongement en % : $A\%$	A (%) = $((L_u - L_0) / L_0) \times 100$
Striction en %: $Z\%$	Z (%) = $((S_0 - S_f) / S_0) \times 100$

CHAPITRE IV
Résultats et interprétations

Nos résultats sont basés sur la microstructure du fil avant et après utilisation, et les propriétés électriques et mécaniques du fil avant et après les traitements thermiques.

IV. 1 Résultats et interprétations de l'examen métallographique des fils de cuivre revêtus en zinc « neuf, traité et usagé »

Les figures présentées dans cette partie montrent la microstructure du fil neuf avant et après le traitement thermique et celle du fil usagé.

IV.1.1 Résultats métallographiques du fil neuf

IV.1.1.1. Observation par microscopie optique

La figure IV.1 représente l'image de la surface selon la section d'un fil neuf avant l'attaque chimique. Après attaque chimique, l'observation de la microstructure au microscope optique donne les micrographies de la figure IV.2 :

- l'image –a présente la section longitudinale d'un fil neuf après l'attaque à chlorure ferrique.
- l'image –b présente le grossissement X500 de l'interface entre l'âme et le revêtement.

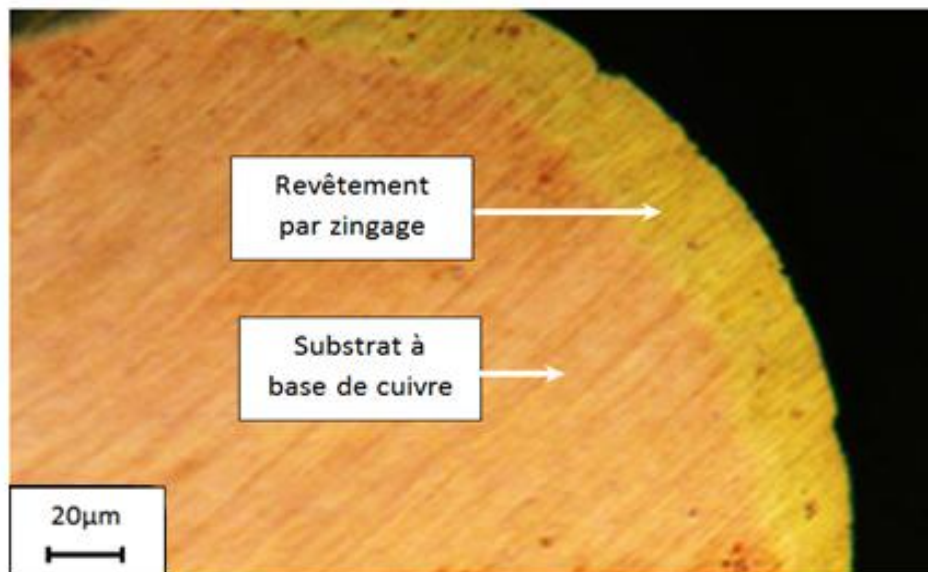


Figure IV.1. Structure verticale d'un fil neuf en cuivre revêtu en zinc, poli mécaniquement non attaqué.

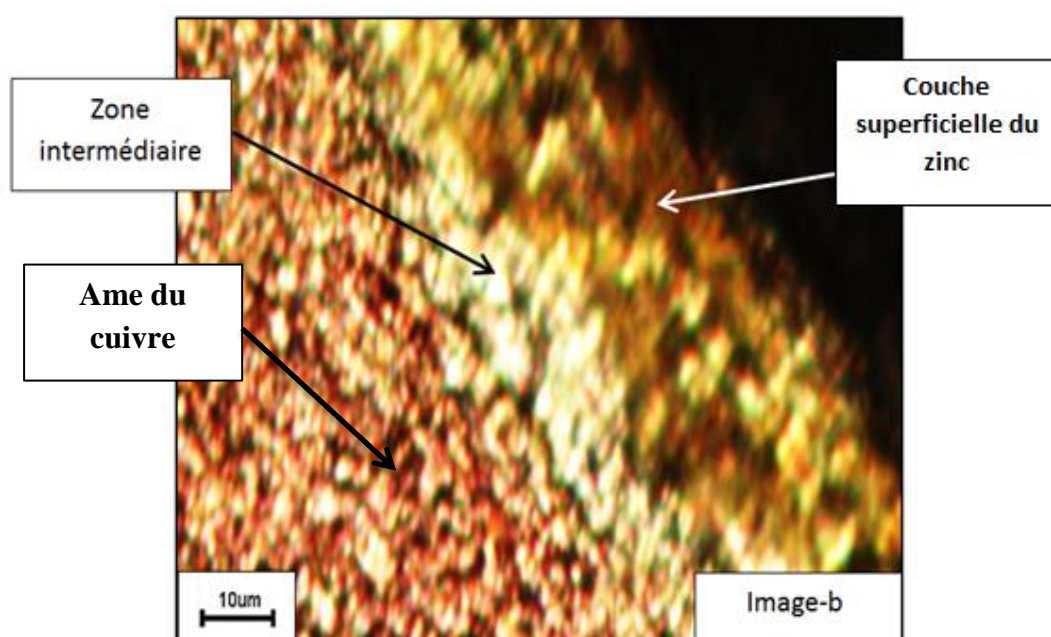
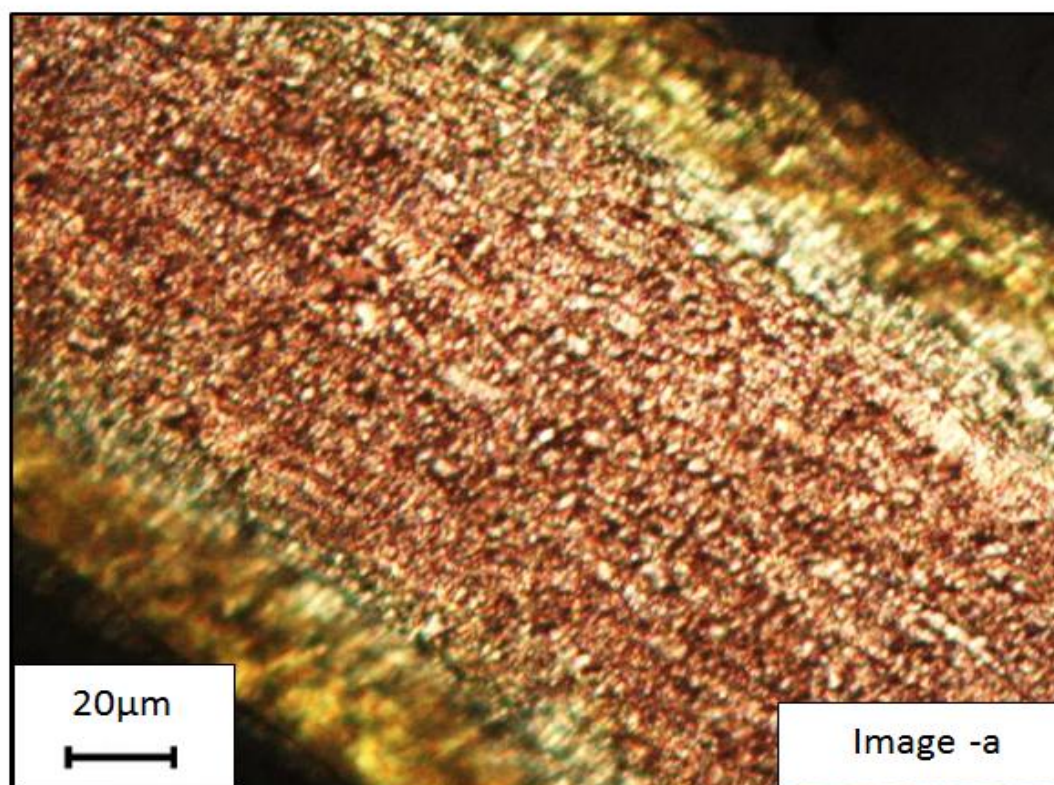


Figure IV.2. Micrographie horizontale du fil neuf après l'attaque à chlorure ferrique.

Image -a. Grossissement X200

Image-b. Grossissement X500

La **Figure IV.3** montre que notre fil est un fil de cuivre α revêtu en zinc diffusagé en β . Nous avons traité nos micrographies par le logiciel 'image J' qui nous a permis d'augmenter le contraste et de rendre les phases plus nettes.

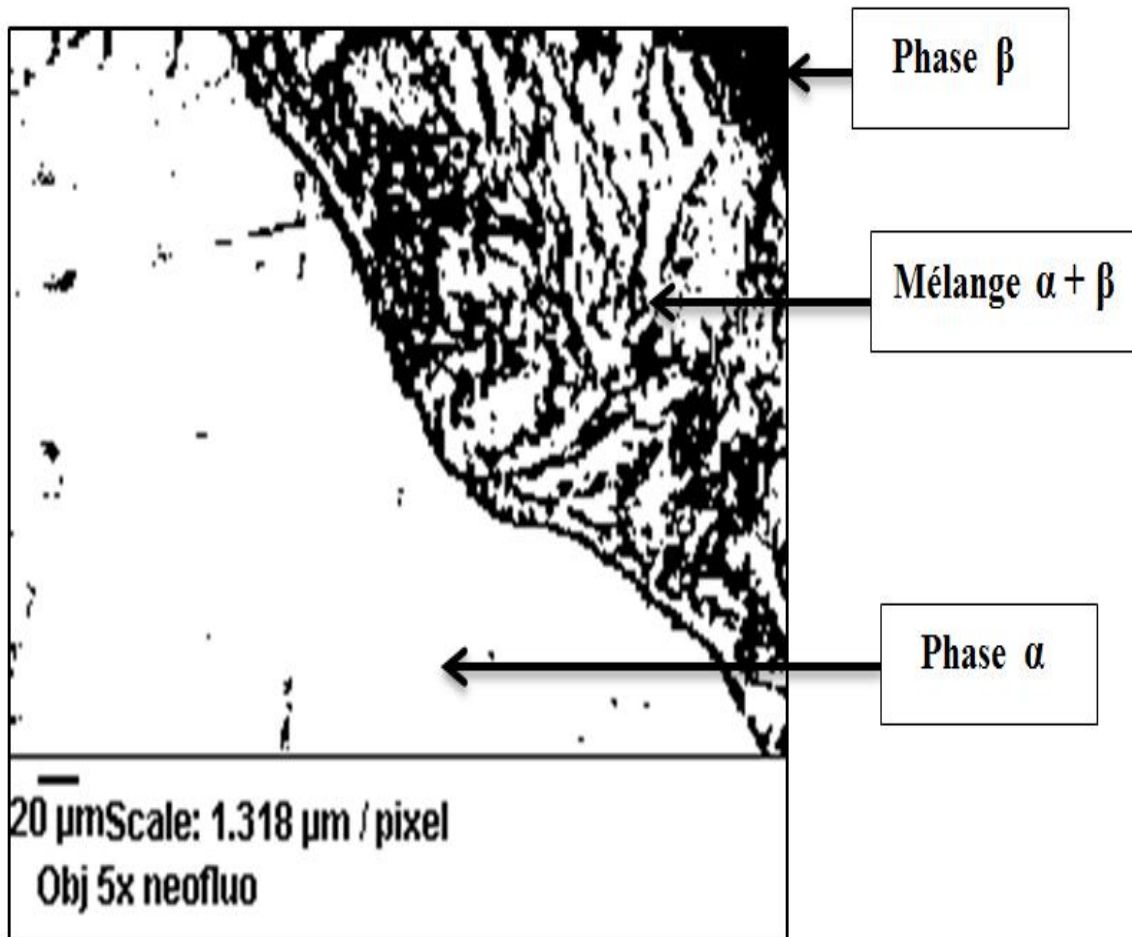


Figure IV.3. Image binaire montrant le fil à âme de cuivre α et couche de zinc diffusagé en phase β , attaqué au nital, après traitement d'image.

On remarque la présence de trois zones constituées par deux phases réparties respectivement du centre du fil jusqu'à sa surface extérieure :

- Un substrat du cuivre en phase α ;
- Une zone intermédiaire de diffusion biphasée ($\alpha+\beta$) ;
- Une couche en phase β riche en zinc qui est celle du revêtement.

IV.1.1.2. Résultats métallographiques de microscopie électronique à balayage

L'observation de la structure du fil au microscope électronique à balayage aux grossissements X250 et X 1000 (Figure IV.4. a et b) nous a permis d'examiner l'état de surface du fil neuf sans attaque chimique.

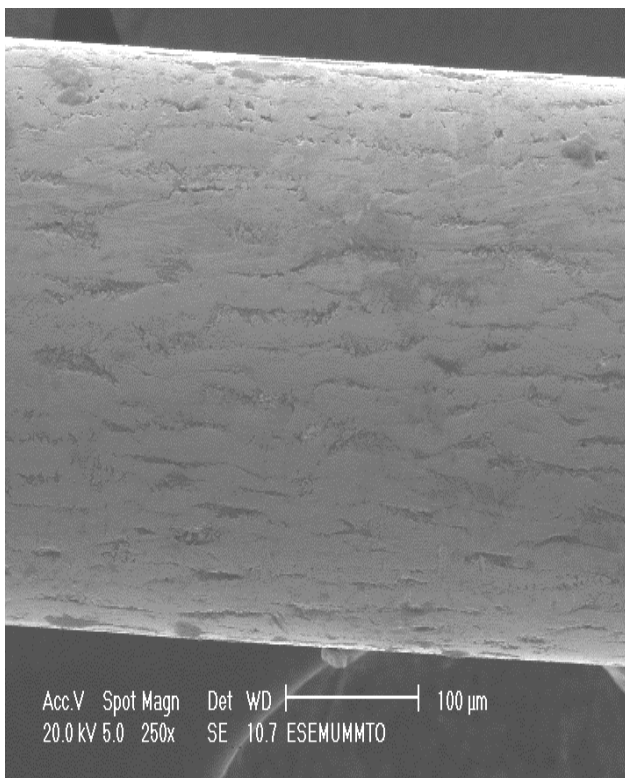


Image. a

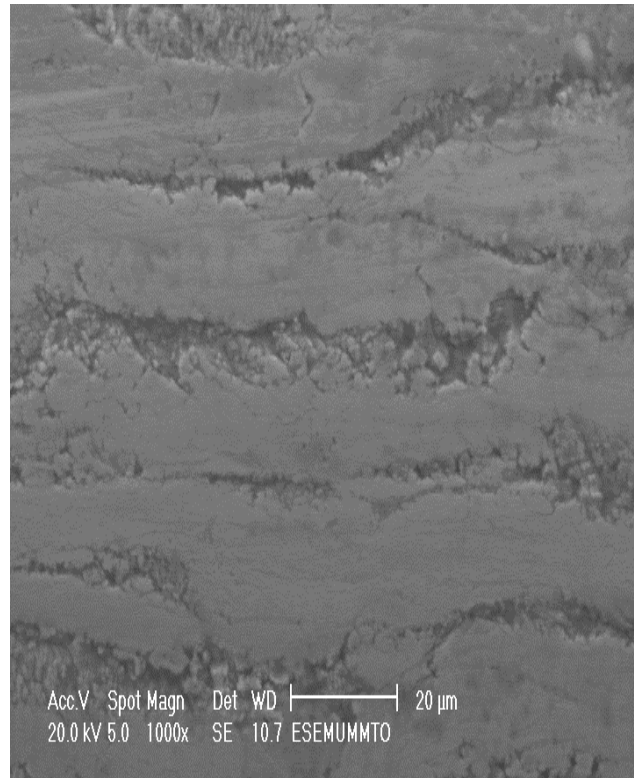


Image. b

Figure IV.4. Micrographie MEB de la surface du fil neuf.

Les observations en MEB de la surface du fil neuf nous montrent l'existence d'hétérogénéités morphologiques sur la couche superficielle du revêtement. La présence de ces défauts peut être due à la structure hétérogène lors de tréfilage ou bien après le traitement de surface par zingage.

IV.1.2. Résultats métallographiques du fil usagé

IV.1.2.1. Résultats métallographiques de microscopie optique

La figure IV.5 représente l'image de la surface longitudinale d'un fil usagé avant l'attaque chimique.

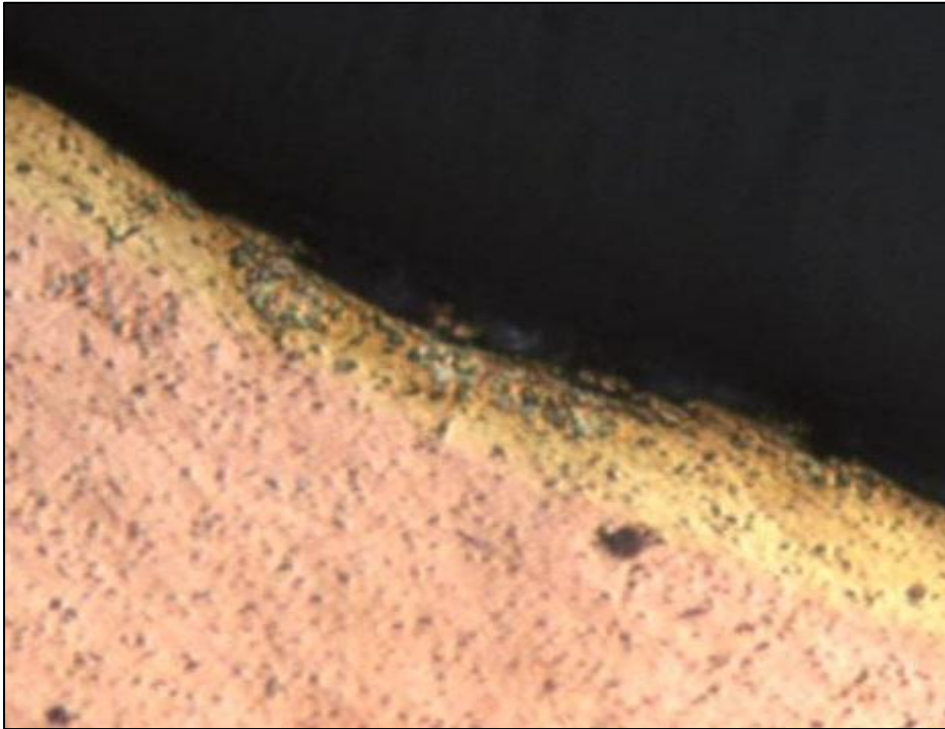


Figure IV.5. Structure d'un fil usagé en cuivre revêtu en zinc, poli mécaniquement non attaqué.

Après l'attaque chimique, l'observation de la microstructure optique donne les micrographies de la figure IV.5 : l'image –a présente la section longitudinale d'un fil usagé après l'attaque au chlorure ferrique, l'image –b présente le grossissement X 500 de l'interface entre l'âme et le revêtement.

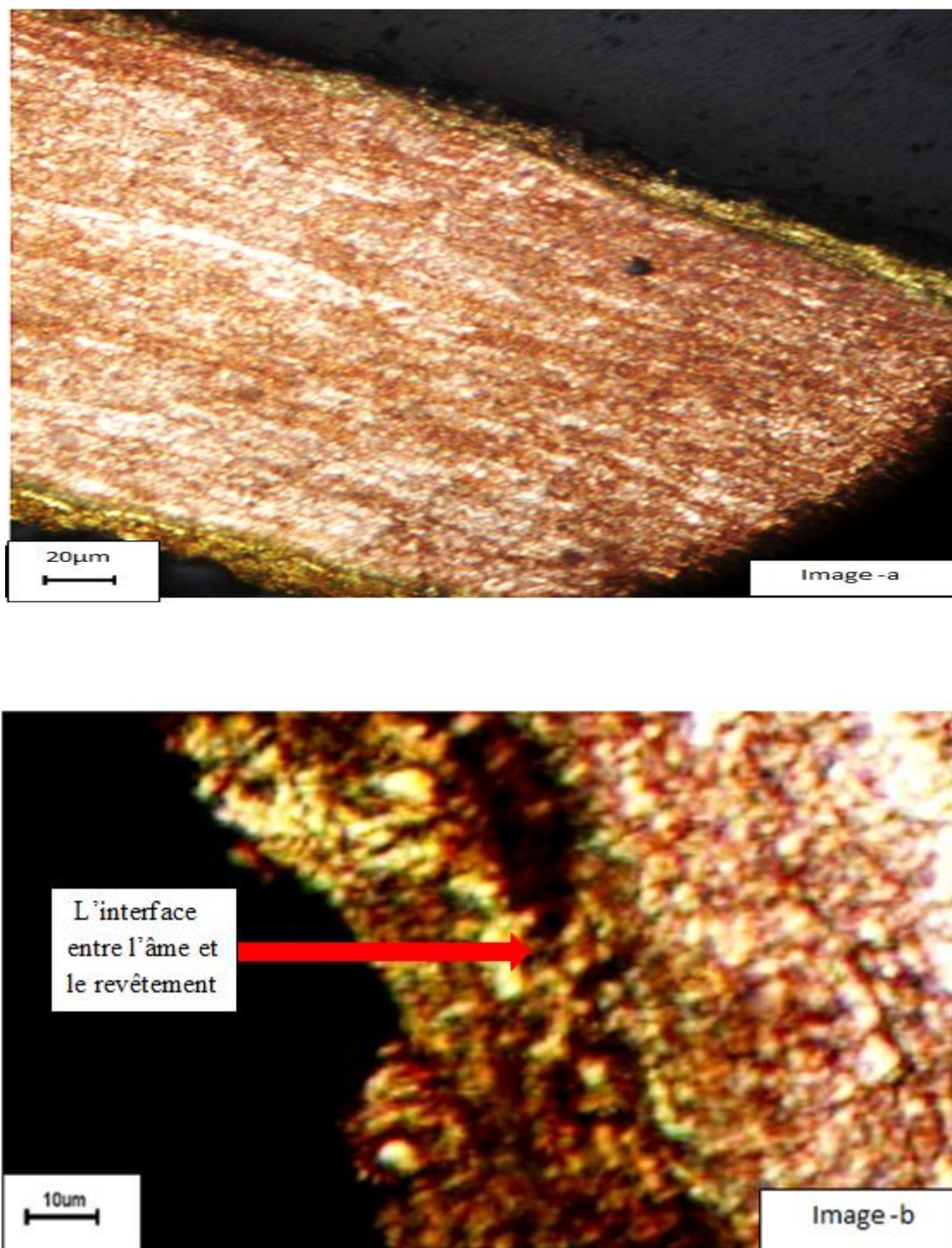


Figure IV.6. Micrographie de l'interface d'un fil usagé après l'attaque à chlorure ferrique.

La figure IV.6 montre que la couche superficielle du fil était érodée lors l'étape de l'usinage.

- L'image -a présente la section longitudinale d'un fil usagé après l'attaque au chlorure ferrique.
- l'image -b présente l'interface entre l'âme et le revêtement.

Cette érosion est due aux conditions violentes de l'électroérosion (une zone de plasma se forme, atteignant une température qui peut aller théoriquement jusqu'à 8000°C et une pression d'environ 40 bars [28], ce qui cause la dézignification (due aux hautes températures) qui a lieu lors de la découpe de la pièce.

IV.1.2.2. Résultats métallographiques de microscopie électronique à balayage

Afin de révéler l'état de surface de notre fil usagé, nous avons réalisé l'image MEB présentée dans la figure IV.7 ci-dessous.

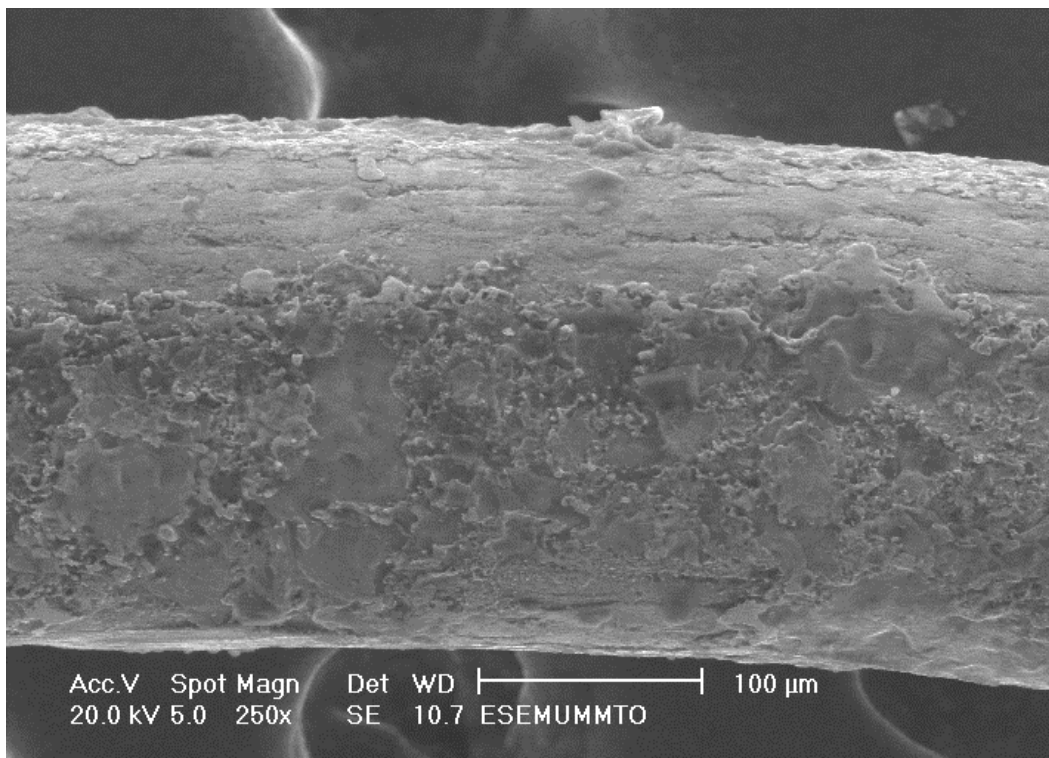


Figure IV.7. Micrographie MEB de la surface du fil usagé.

Lors du procédé d'usinage par étincelage, la tension électrique se décharge et une étincelle jaillit. A l'endroit où elle entre en contact avec la pièce, la chaleur est telle que le métal fond et s'évapore. Il apparaît alors un cratère. L'installation crache des étincelles les unes après les autres et les cratères se forment les uns à côté des autres. Le diamètre du cratère photographié est d'environ 100 μm. La prise de vue a été faite avec le MEB sur la couche superficielle du fil usagé aux grossissements X250 et X500 la **Figure IV.8.**

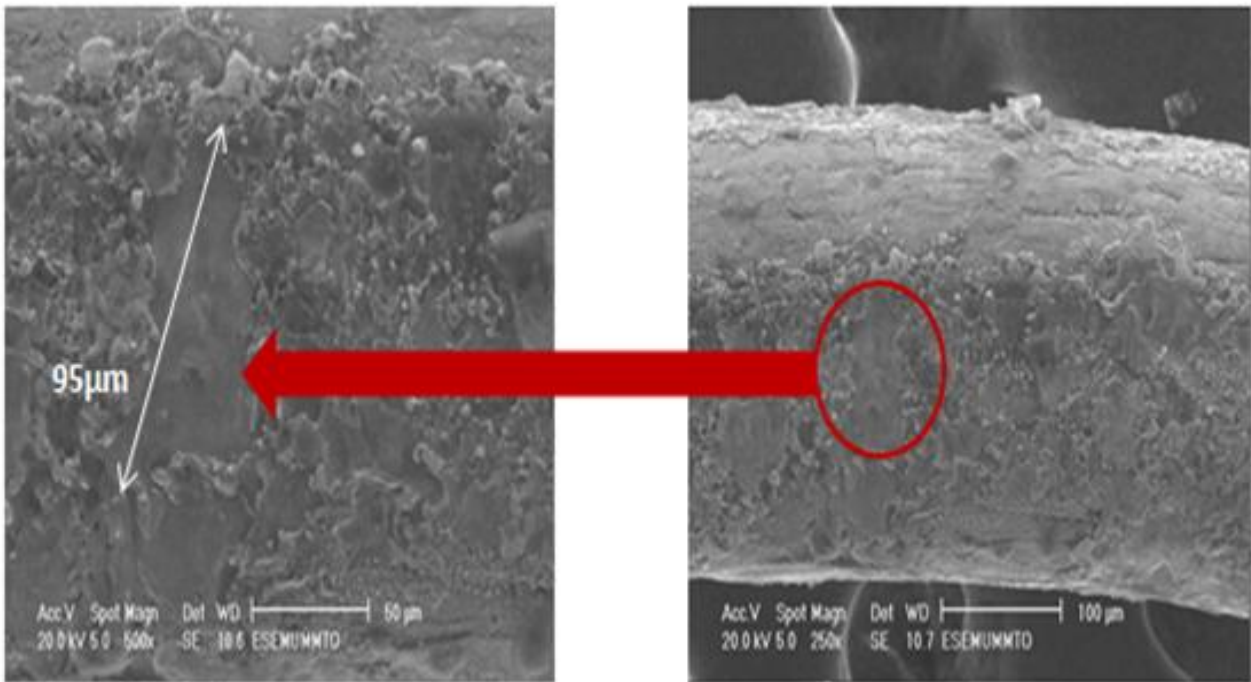


Figure IV.8. Cratères d'érosion sur des fils usagés.

Les défauts de surface repérés à l'état neuf ont évolué dans la taille et la forme. Nous pouvons constater la rupture de la couche de revêtement ayant lieu dans certaines zones du fil laissé par les étincelles. Cela dû à l'entraînement des résidus d'érosion par cette couche et du refroidissement très rapide du fil.

IV.1.4. Evolution de la structure du fil neuf après traitement thermique

Dans cette partie on cherche à connaître les effets des traitements thermiques sur le fil neuf. Pour cela on a fait un cycle d'un traitement thermique de recuit dans un four sous vide schématisé sur la **Figure IV.9**.

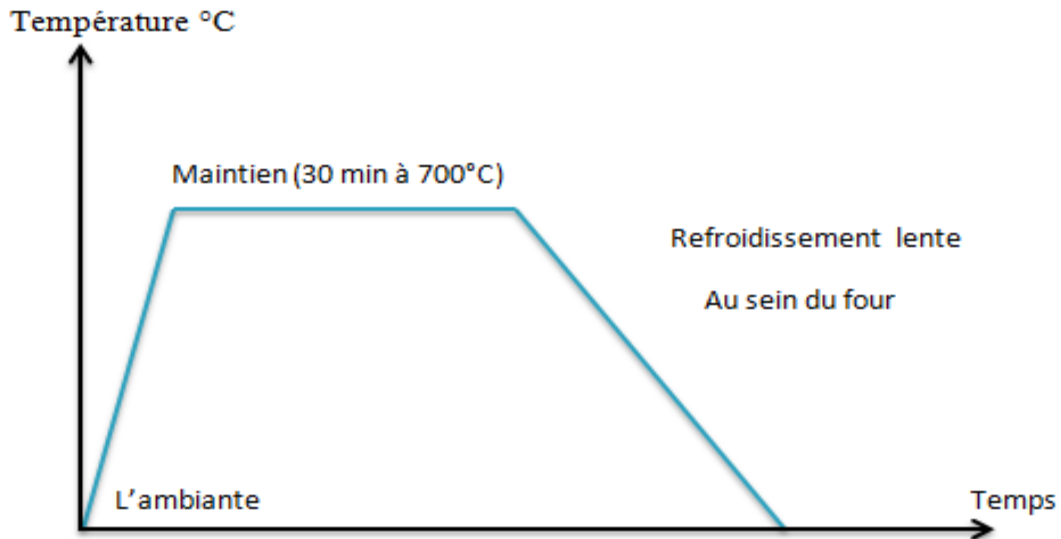
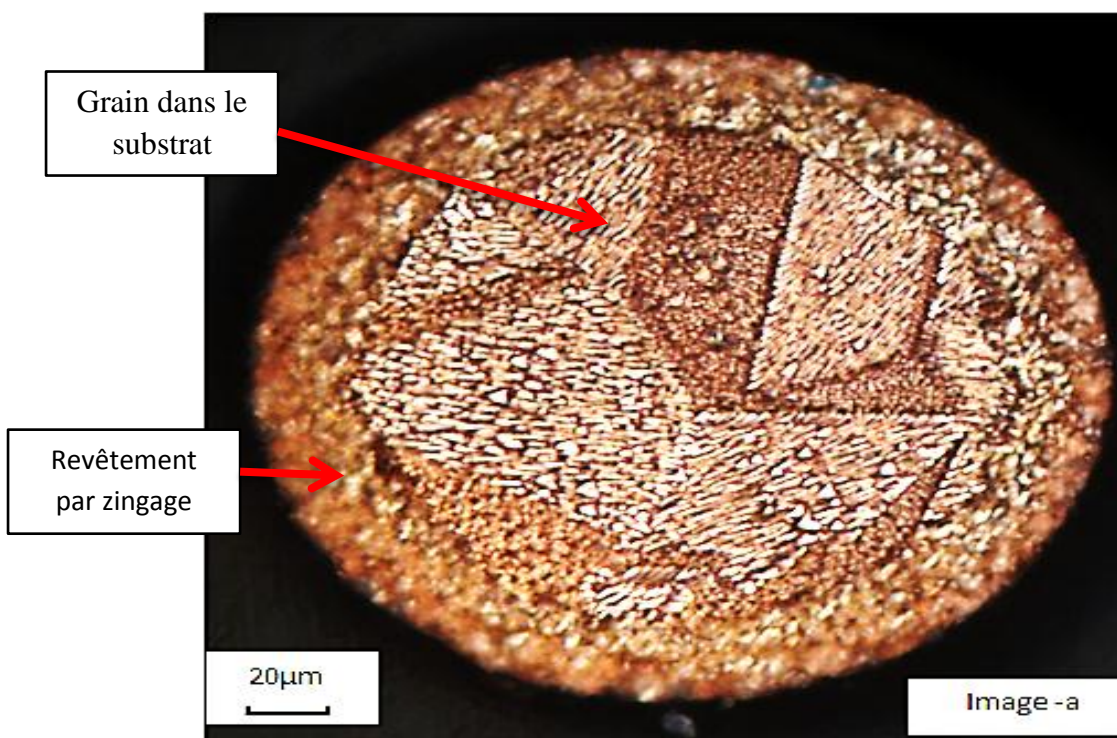


Figure IV.9. Cycle de traitement thermique de recuit d'un fil de cuivre zingué.

Généralement on recuit à une température supérieure à la moitié du point de fusion sur l'échelle de température absolue. Le cuivre fond à $1083^{\circ}\text{C} = 1356^{\circ}\text{K}$ donc on recuit à plus de $678^{\circ}\text{K} = 541^{\circ}\text{C}$. Seulement, cela prend très longtemps dans le bas de la fourchette de température donc il est plus courant de recuire vers les 700 à 800°C.

IV.1.4.1. La micrographie du fil après traitement thermique

La figure IV.10 illustre l'état microstructural du fil après traitement thermique à 700°C.



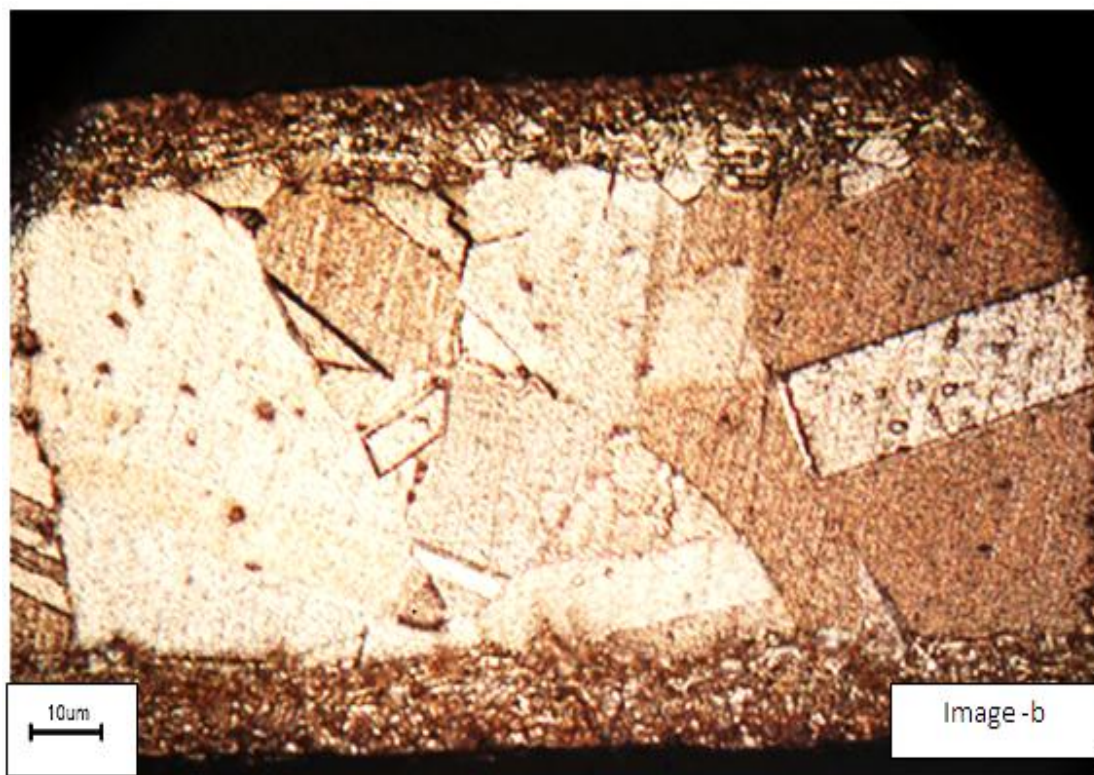


Figure IV. 10. Micrographie du fil traité après l'attaque à chlorure ferrique.

Image -a. position transversale

Image-b. position longitudinale

Un grossissement important des grains est remarqué au niveau de l'âme à base de cuivre où on observe des grains polygonaux et maclés dont la taille est de l'ordre de dixième de micromètre. Le revêtement sous l'effet de l'élévation de la température a vu son épaisseur légèrement augmenter sous l'effet de la diffusion du zinc dans le substrat de cuivre.

IV. 2 Résultats et interprétations de l'influence du traitement thermique sur la résistivité électrique

Dans cette partie, on a déterminé la résistivité électrique de fil neuf et du fil usagé, et du fil neuf après les traitements du recuit respectivement à 700 °C, 750°C et 800°C.

On rappelle que la résistivité électrique est calculée par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{R}{L} * S \quad \text{avec} \quad R = \frac{U}{I}$$

Avec :

ρ : la résistivité électrique du fil ($\mu\Omega.cm$) ;

R : la résistance du fil ($\mu\Omega$) ;

U : la tension (mV) ;

I : l'intensité de courant (mA) ;

L : la distance entre les crochets (les points de contact avec le fil) cm ;

S : la surface de bout frontal de fil (cm^2).

Application numérique :

$$L = 5 \text{ cm} ; \quad S = 4.9 * 10^{-4} \text{ cm}^2.$$

IV. 2.1 Détermination de ρ_{moy} du fil neuf et du fil usagé

Les tableaux IV.1 et IV.2 résument les résultats de la mesure de la résistivité électrique du fil avant et après son utilisation.

Tableau IV.1. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil neuf.

I (A)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
U (mV)	3,14	6,06	9,08	12,09	15,1	18,12
R (m Ω)	31,4	30,30	30,26	30,22	30,2	30,2
ρ ($\mu\Omega.cm$)	3,07	2,96	2,96	2,96	2,95	2,95

$$\rho_{moy} = 2,98 \mu\Omega.cm.$$

Tableau IV.2. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil usagé.

I (A)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
U (mV)	3,19	6,27	9,3	12,31	15,38	18,45
R (mΩ)	31,9	31,35	31	30,77	30,76	30,75
ρ ($\mu\Omega$.cm)	3,12	3,07	3,03	3,01	3,01	3,01

$$\rho_{\text{moy}} = 3,05 \mu\Omega.\text{cm}$$

IV. 2.2. Détermination de ρ_{moy} du fil après les traitements thermiques

Les tableaux IV.3, IV.4 et IV.5 résument les résultats de la mesure de la résistivité électrique du fil après les recuits à 700, 750 et 800°C.

Tableau IV.3. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil après un recuit à 700°C.

I (A)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
U (mV)	3	5,85	8,7	11,48	14,3	17
R (mΩ)	30	29,25	29	28,7	28,6	28,333
ρ ($\mu\Omega$.cm)	2,94	2,86	2,84	2,81	2,80	2,77

$$\rho_{\text{moy}} = 2,84 \mu\Omega.\text{cm}$$

Tableau IV.4. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil après un recuit à 750 °C.

I (A)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
U (mV)	2,82	5,48	8,12	10,81	13,49	16,19
R (mΩ)	28,20	27,40	27,06	27,02	26,98	26,98
ρ ($\mu\Omega$.cm)	2,76	2,68	2,65	2,64	2,64	2,64

$$\rho_{\text{moy}} = 2,67 \mu\Omega.\text{cm}$$

Tableau IV.5. Variation de la tension (U), la résistance (R), et la résistivité (ρ) en fonction de courant (I) du fil après un recuit à 800 °C.

I (A)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
U (mV)	2,66	5,16	7,66	10,2	12,73	15,26
R (mΩ)	26,60	25,80	25,53	25,50	25,46	25,43
ρ ($\mu\Omega$.cm)	2,60	2,52	2,50	2,49	2,49	2,49

$$\rho_{\text{moy}} = 2,52 \mu\Omega.\text{cm}$$

La représentation des valeurs de la résistivité électrique de différents fils sous forme d'histogramme (figure IV.11) nous permet de mettre en évidence l'effet des traitements thermiques sur la résistivité électrique.

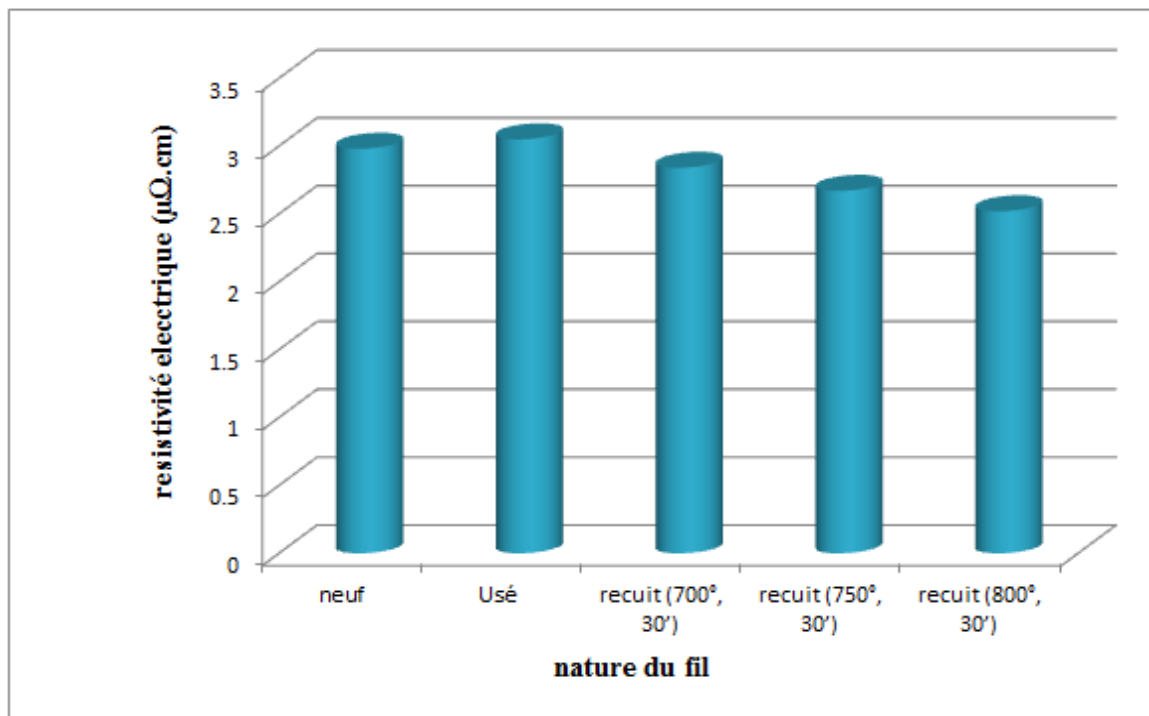


Figure IV.11. Variation de la résistivité électrique avec la nature des fils.

D'après la figure IV.11, on constate que la résistivité électrique du fil neuf diminue avec l'augmentation de sa température de recuit, ce qui se traduit par l'élimination des imperfections structurales (lacunes et dislocations) qui gênent la mobilité des électrons et offre une nouvelle structure avec grossissement notable des grains.

Le fil usagé a la résistivité électrique la plus haute, cela est dû à l'endommagement qu'il a subi lors la période de l'usinage. Celui-ci est dû au passage d'un courant à haute intensité à travers le fil, en plus de son refroidissement par l'eau déionisée et son tractage par les galets ce qui le rend non rectiligne et se brise facilement.

IV.3. Résultats et interprétations de l'essai de microdureté

Le tableau IV.6 résume les résultats de l'essai de microdureté $HV_{0.025}$ pour les échantillons avant et après traitement thermique. Le choix d'une charge égale à 25gr nous a permis de localiser la mesure soit dans l'âme à base de cuivre soit dans revêtement en zinc.

Tableau IV.6. Dureté Vickers pour les différents échantillons neuf, usagé et traité.

Fil	HV Ame (cuivre)	HV Revêtement (zinc)
EV neuf	115,4	95.0
EH neuf	113.2	94,5
EV usagé	105.9	89.5
EH usagé	104.6	87.9
EV + (700°, 30')	77.6	66.9
EH + (700°, 30')	77.0	64.1
EV + (800°, 30')	74,7	63 .0
EH + (800°, 30')	74.1	61.4
EV + (850°, 30')	71.8	56,7
EH + (850°, 30')	72.2	57,3

En faisant la comparaison entre la microdureté mesurée au sens horizontal et vertical, on note des valeurs rapprochées d'où on confirme l'isotropie de nos fils.

La représentation des valeurs du tableau sous forme d'histogrammes (figures IV.12 et IV.13). Nous permettent de mettre en évidence l'effet des traitements thermiques sur la microdureté.

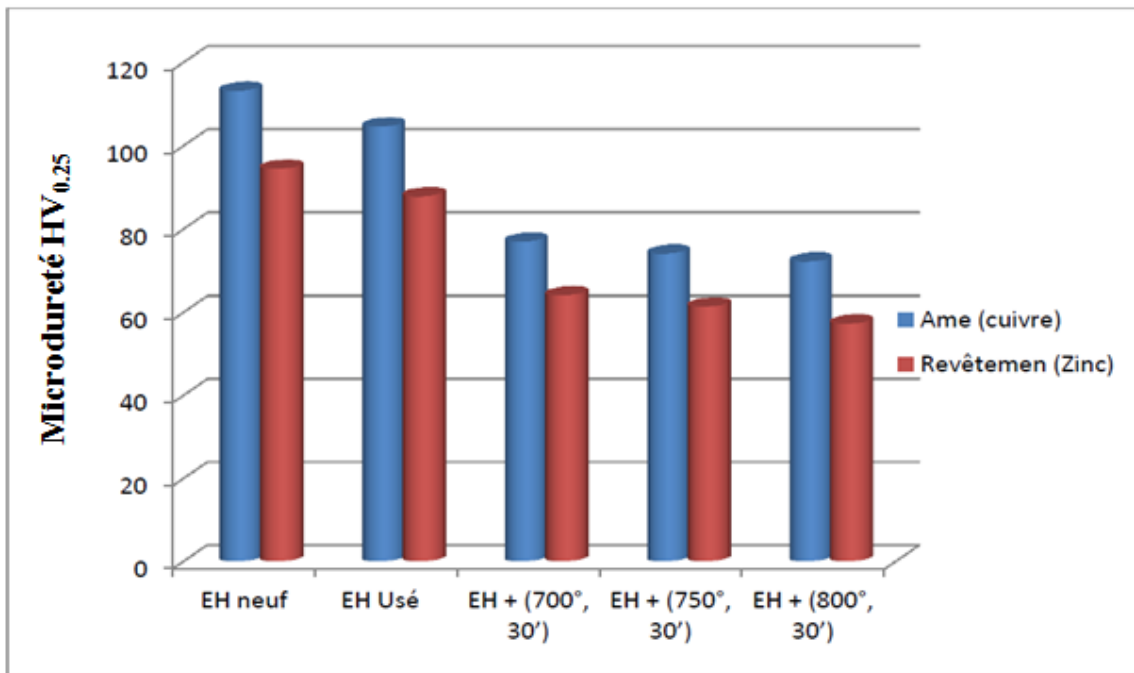


Figure IV.12. Variation de la microdureté des fils dans la position horizontale.

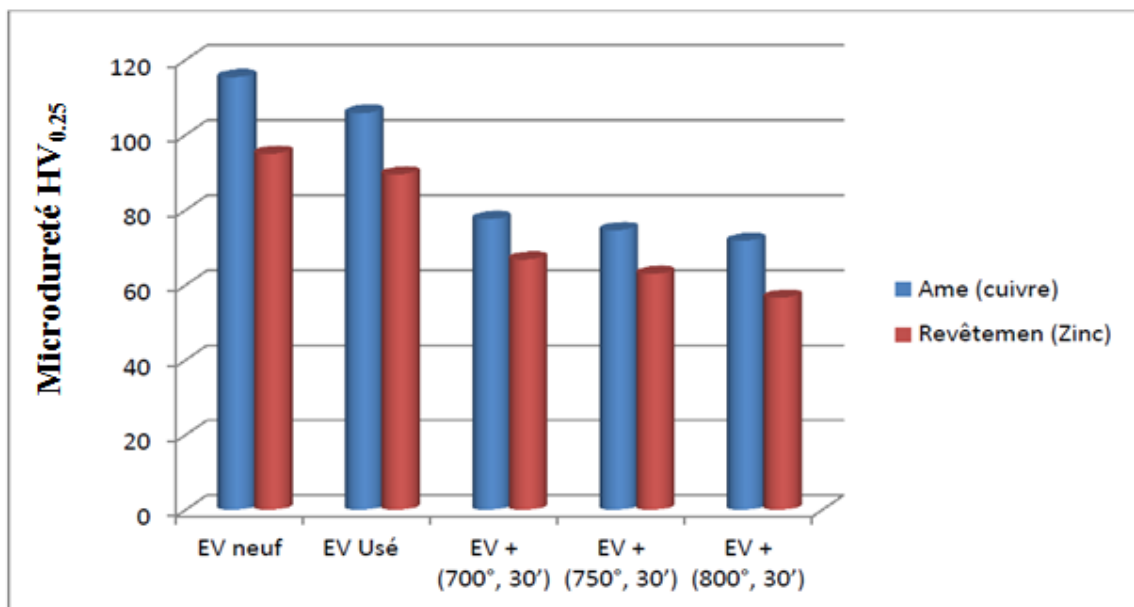


Figure IV.13. Variation de la microdureté des fils dans la position verticale.

A l'état non traité ; les valeurs montrent un léger adoucissement au niveau du revêtement. Après recuit pendant 30 minutes ; nous avons noté un adoucissement sur toute la microstructure dû

au grossissement notable des grains. Le revêtement subit la chute de microdureté la plus importante à cause de la diffusion du zinc thermiquement activé à travers le substrat en cuivre.

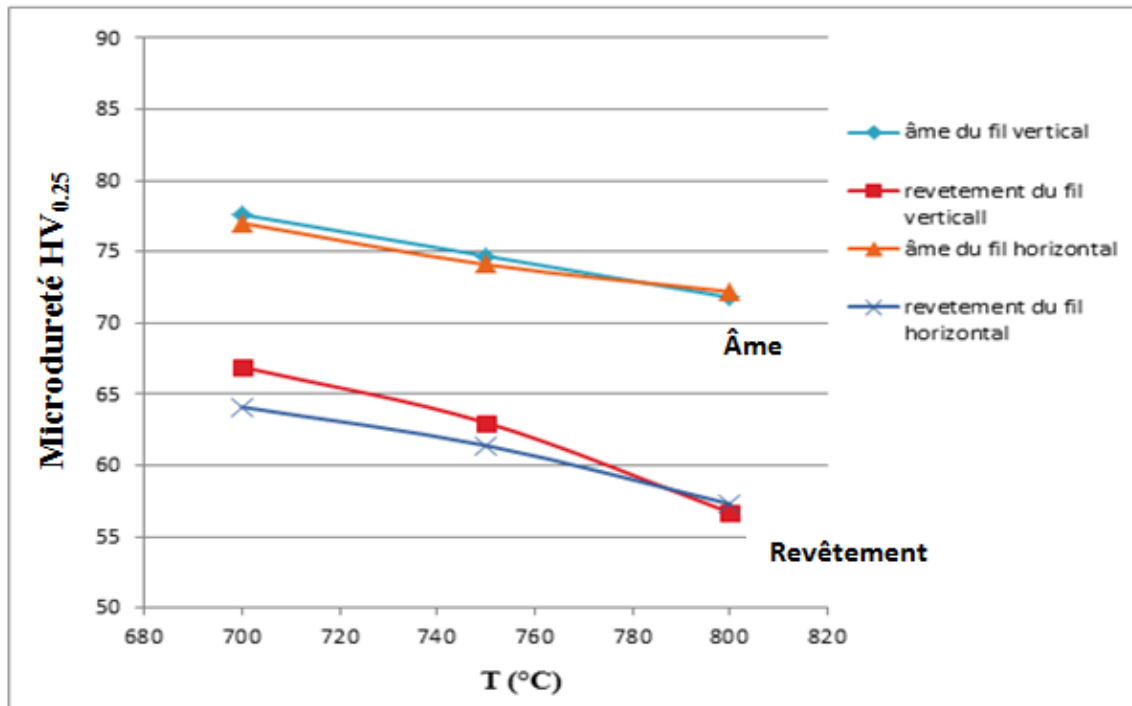


Figure IV.14. Variation de la microdureté avec la température de traitement.

La figure IV.14 montre que quand on augmente la température du recuit, la microstructure subit un adoucissement graduel sous l'effet de la migration des joints de grains et autres défauts structuraux tels que les macles ainsi que la diffusion due au gradient de concentration en zinc depuis la surface vers l'âme.

IV.4. Résultats et interprétations de l'essai de traction

L'interprétation des résultats repose sur le dépouillement de la courbe de traction qui représente l'allongement en fonction de la progression de la charge de traction

Les courbes de traction obtenues sont illustrées sur les figures IV.15 et IV.16.

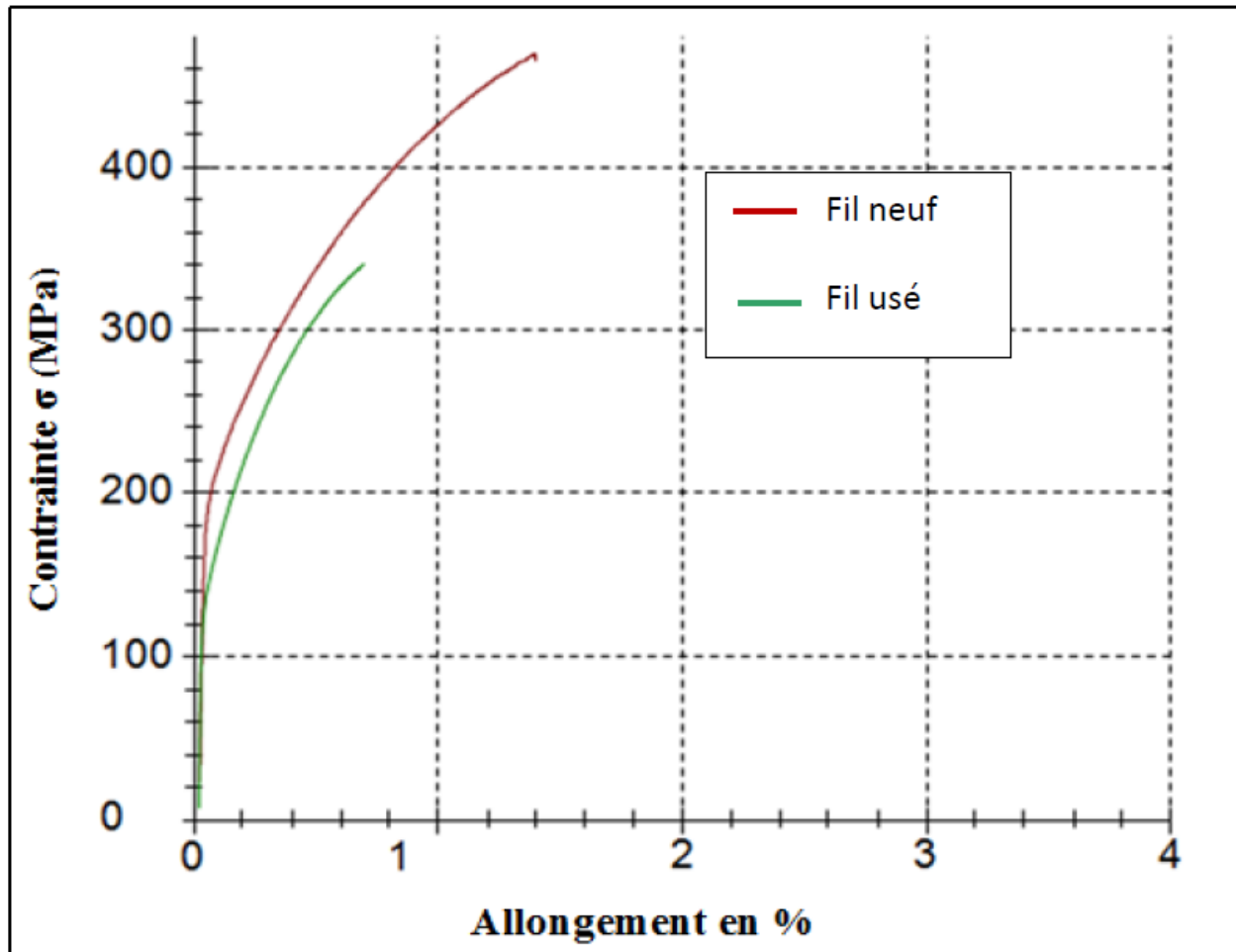


Figure IV.15. Courbes de traction superposées du fil neuf et le fil usagé.

L'allure des courbes des fils neuf et usagé présentent une forme similaire : le domaine élastique est au-dessus de 100MPa et dans le domaine plastique les deux courbes sont hyperboliques et presque parallèles. La Figure IV.15 montre que la force de rupture du fil usagé est petite par rapport au fil neuf et l'allongement est plus grand dans le cas de fil neuf, ce qui a dû à la présence des cratères sur la surface du fil usagé

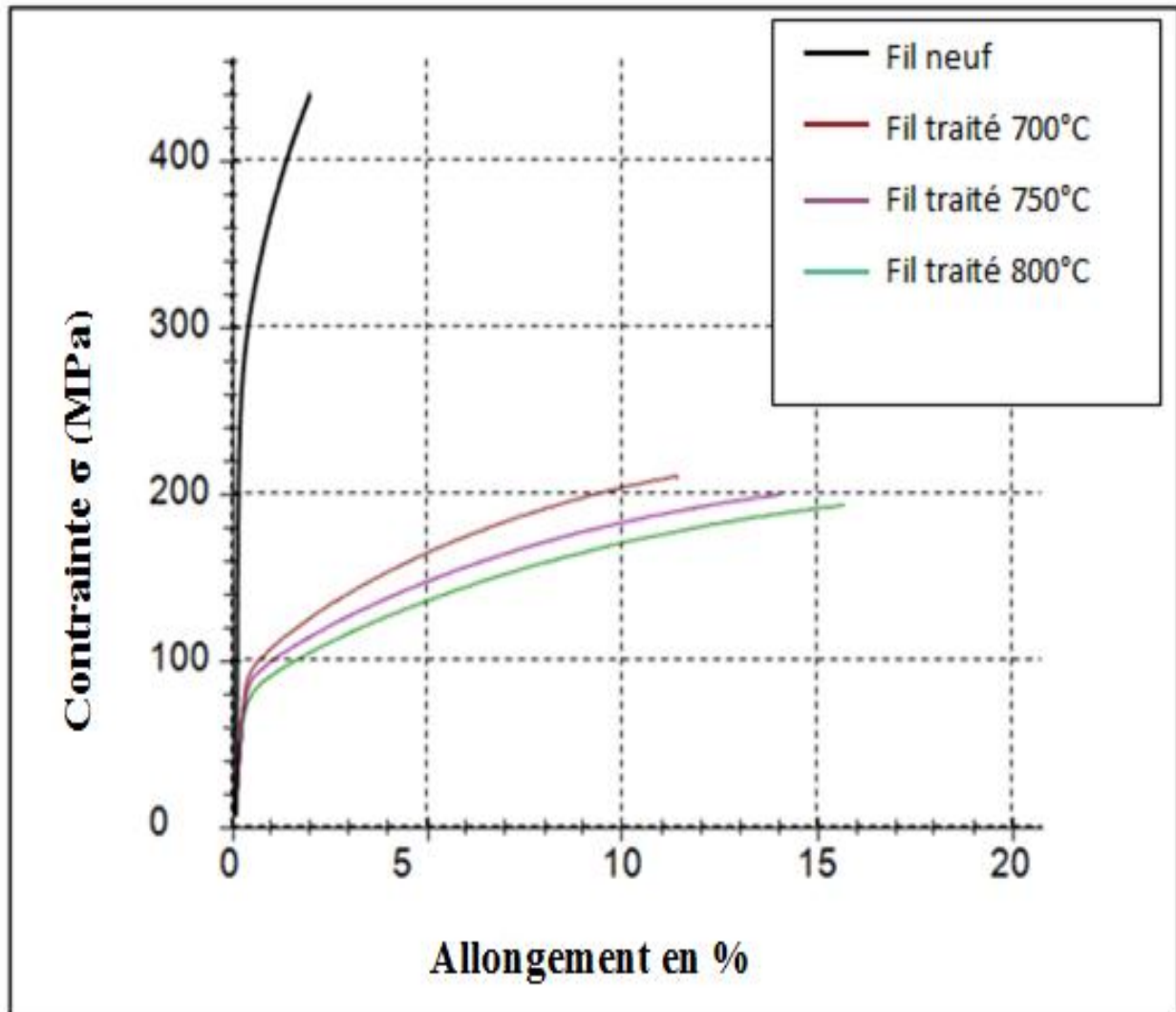


Figure IV. 16. Courbes de traction superposées du fil neuf et les fils traités à 700°, 750° et 800°C.

Les courbes de l'échantillon neuf et les échantillons traités thermiquement présentent deux allures différentes dues à l'évolution de la microstructure adoucie après le recuit. Les échantillons traités thermiquement présentent un domaine élastique étroit et un domaine plastique largement supérieur comparé à l'échantillon neuf. Le domaine élastique est au-dessous de 100 MPa dans les cas au fil traité, et environ 200MPa dans le cas au fil neuf. La force de rupture de fil à l'état neuf est très grande par rapport aux fils traités. La force de rupture diminue avec l'augmentation de la température de recuit alors que l'allongement augmente avec la température du recuit.

Le tableau IV.7 résume les résultats de l'essai de traction pour les différents fils avant et après utilisation, et après les traitements thermiques.

Tableau IV.7. Résultats du dépouillement des courbes de traction.

Type des fils	S_0 (mm ²)	L_0 (mm)	Allongement de rupture (%)	Force de rupture σ (MPa)
Fil neuf	0,049	200	1,42	475,18
Fil usagé	0,049	200	0,71	332,96
Fil traité à 700 °C	0,049	200	12,26	209,91
Fil traité à 750 °C	0,049	200	14,03	199,89
Fil traité à 800 °C	0,049	200	15,82	189,96

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les conditions violentes de l'électroérosion imposent de bien choisir le matériau pour le fil. Le fil est choisi en fonction de ses propriétés mécaniques et électriques, par conséquent, le fil doit avoir : une haute résistance à la traction, une haute conductivité électrique, une basse température de fusion et une basse température requise pour maintenir une pression de vaporisation donnée.

Dans ce travail nous avons étudié la micrographie d'un fil pour l'électroérosion avant et après son utilisation, et l'effet des traitements thermiques sur la structure de ce fil. Ainsi leurs propriétés électriques et mécaniques. Cette étude nous a conduits aux résultats suivants :

- Le fil est un fil en cuivre zingué et n'est pas un alliage cuivre zinc (laiton).
- Le fil est un fil traité thermiquement (zingage).
- La structure du fil est une structure biphasée $\alpha\beta'$.
- Le fil est affecté lors de son utilisation (présence des cratères sur la surface du fil usagé).
- Les résultats expérimentaux confirment la bonne qualité de ce fil pour être un excellent fil de découpe.

Enfin nous notons que ce travail reste ouvert et à enrichir. Pour cela nous proposons comme suite à ce travail :

- ❖ De faire une analyse chimique du fil par diffraction X (DRX).
- ❖ D'utiliser le Microscope électronique à transmission (MET) pour mieux identifier la structure.
- ❖ De choisir un fil non traité pour bien voir les effets des traitements thermiques.
- ❖ D'effectuer d'autres traitements thermiques à différentes plages de températures.

Références bibliographiques

- [1]: collectif, manuel de formation Charmilles robofil x020/x030 SI, Charmilles technologies S.A. (2000)
- [2]: J. PFAU, F. BALLEYS et D.CONVERS, électrode pour l'usinage par étincelage érosif. Brevet FR 2 418 699 (1979).
- [3]: B.BOMMELI et D. SCHNELLMANN, électrode en forme de fil pour le découpage d'une pièce métallique par étincelage érosif. Brevet CH 633 739 (1982).
- [4]: Daniel KREMER, usinage par électroérosion, BM 7 251 techniques de l'ingénieur, traite génie mécanique, 2003.
- [5]: C. JOSEPH, contribution à l'accroissement des performances du processus de μ EDM par l'utilisation d'un robot à dynamique élevée et de haute précision, thèse N° 3281 (2005).
- [6]: E. BUD GUITRAU, EDM HANDBOOK, Hanser Gardner publication, ISBN 1-56990-242-9 (1997)
- [7]: A. GAMBONI, process and apparatus for electric discharge machining brevet EP 1234630 (2002).
- [8]: RAJURKAR (K.P.), WANG (W.M.) et ZHAO (W.S.), WEDM adaptive control with a multiple input model for identification of work piece height. Annals of the CIRP, vol. 46/1 (1997).
- [9]: ALBINSKI (K.). The polarity of electrodes in electro discharge machining. Int. Symp. For Electro Machining, ISEM XI p. 95-103 (avr.1995).
- [10]: diapo d'exposé. Réalisé par Boukhazani Fathi, Dirigé par Col. ISRIG. K. (Electroérosion).
- [11]: A Reference to Understanding, Selecting and Using Wire on Wire-cut EDM Machines, selecting and using wire on wire-cut EDM machines, second edition, intech EDM 1995, printed in u.s.a.
- [12]: K. SHODA, Y.KANEKO, H.NISHIMURA et M.KUNIEDEA development of adaptative control system to prevent EDM wire breakage, EDM technology tranfer, vol.3 (1995).
- [13]: R. SNOEYS, W.L. DEKEYSER geometrical accuracy of wire EDM, EDM technology, vol. 1 (1993).
- [14]: Michel DUPEUX : « aide-mémoire science des matériaux », Dunod, Paris, 2004.
- [15]: Michel COLOMBIE et coll : « les matériaux métallique », Dunod, Paris, 2008.
- [16]: F. FISCHER et H. VOSSKUHLE, Metall, 1961, 15, N° 11, pp. 1073-1075.
- [17]: F. SANTINI et J.TIGEOT, la Technique Moderne, 1966, N° 7-8 (N° spécial Traitements Thermiques, tome II), pp.36-39.
- [18]: Struers. Application Notes, Préparation métallographique du cuivre et des alliages de cuivre, Printed in Denmark by rosendahls Bogtrykker, www.struers.com.
- [19]: H .DE LEIRIS, METAUX ET ALLIAGES TOME III, MASSON ET C^{ie}, EDITEURS

120, B^d S^t-Germain, paris VI^e 1971.

- [20]: ASM International, The Materials Information Company, HANDBOOK, Heat Treating, VOLUME 4, 1991.
- [21]: Dominique ARNAUD, Jean BARBERY, Roger BIAIS, Bernard FARGETTE et Pierre NAUDOT, Propriétés du cuivre et de ses alliages, M430 technique de l'ingénieur, traité Matériaux métallique, 2003.
- [22]: J.P. BRIFFOD, Zinc or cadmium coated, surface oxydized electrode wire for EDM cutting of a workpiece; and method for forming such a wire, Brevet US 4 977 303 (1990).
- [23]: H. GROOS, H. HERMANI, Erodielektrode, insbesondere Drahtelektrode für die funkenerosive Bearbeitung. Demande de brevet EP 0 312 674 A1 (1989).
- [24]: L. LACOURCELLE, Traité de Galvanotechnique, Galva-conseil Edition. ISBN 2- 95092090-X (1996).
- [25]: M. MOREAU Technical experience in the continuous heat treatment of wire. Wire J. (USA), Nov. 1979.
- [26]: Roger N. Wright. Wire technology, process engineering and metallurgy, British Library, 2011
- [27]: G. VIART, J. PELERIN et A. LIMARE, Fil d'acier dur galvanisé à très haute résistance à la corrosion (procédé Galfan). Surfaces n° 159, juin-juil. 1983.
- [28]: Source Charmilles technologies, EDM_04_06. Doc, technique de fabrication, EI ARC & EIG, septembre 2004.